



HELSINGIN YLIOPISTO
HELSINGFORS UNIVERSITET
UNIVERSITY OF HELSINKI



HELSINGIN YLIOPISTO
HELSINGFORS UNIVERSITET
UNIVERSITY OF HELSINKI

Pro gradu -tutkielma
Geologia
Hydrogeologia ja ympäristögeologia

SUOMEN MATALAPOHJAVEDEN LÄMPÖTILA, SIIHEN VAIKUTTAVAT
TEKIJÄT JA VALTAKUNNALLISEN LÄMPÖTILAKARTOITUKSEN
KÄYTTÖKELPOISUUS GEOENERGIAPOTENTIAALIN ARVIOINNISSA

Sini Hietula

2018

Ohjaajat:
Teppo Arola
Kirsti Korkka-Niemi

HELSINGIN YLIOPISTO
MATEMAATTIS-LUONNONTIETEELLINEN TIEDEKUNTA
GEOTIETEIDEN JA MAANTIETEEN OSASTO
GEOLOGIA

PL 64 (Gustaf Hällströmin katu 2)
00014 Helsingin yliopisto



Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta		Laitos/Institution– Department Geotieteiden ja maantieteen osasto	
Tekijä/Författare – Author Sini Hietula			
Työn nimi / Arbetets titel – Title Suomen matalapohjaveden lämpötila, siihen vaikuttavat tekijät ja valtakunnallisen lämpötilakartoituksen käyttökelpoisuus geoenergiapotentiaalin arvioinnissa			
Oppiaine /Läroämne – Subject Geologia			
Työn laji/Arbetets art – Level Pro gradu-tutkielma		Aika/Datum – Month and year Joulukuu 2018	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages 50
<p>Tiivistelmä/Referat – Abstract</p> <p>Huoli fossiilisten polttoaineiden riittävyydestä, kohoavat energian hinnat ja ilmastonmuutos ovat yhdessä Euroopan unionin asettamien direktiivien kanssa lisänneet uusiutuvien energiamuotojen käyttöä niin Suomessa kuin muualla maailmalla. Tätä myöden myös geotermisen energian hyödyntäminen on lähtenyt voimakkaaseen kasvuun. Geotermisellä energialla tarkoitetaan kallio- ja maaperään sekä vesistöihin varastoitunutta energiaa, jota voidaan käyttää sekä viilennykseen että lämmitykseen. Pohjavesistä saatava geotermistä energiaa on ruvettu hyödyntämään entistä enemmän ja lämpötilalla on suuri merkitys vesiä hyödynnettäessä.</p> <p>Työn tarkoituksena on kartoittaa Suomen matalapohjaveden lämpötilajakauma ja pohtia kartoituksen käyttökelpoisuutta Suomen geoenergiapotentiaalin arvioinnissa. Lähtöoletuksena on, että lämpötilat viilenevät mentäessä etelästä pohjoiseen, ja että kaupungistumisesta johtuva lämpösaarekeilmiö nostaa pohjaveden lämpötiloja suurissa kaupungeissa. Työn toisena tarkoituksena on analysoida pohjaveden lämpötilaan vaikuttavia tekijöitä, kuten esimerkiksi pohjavesialueen pinta-alaa, muodostumatyyppiä ja muodostuvan pohjaveden määrää.</p> <p>Työn tuloksina olivat kolme karttaa Suomen matalapohjaveden lämpötiloista ja niiden muutoksesta kahdella eri vuosituohannella. Lämpötilat olivat selkeästi kohonneet 2000-luvulla verrattuna 1900-lukuun. Syynä tähän vaikuttaisi olevan muun muassa ilmastonmuutos ja kaupungistuminen. Pohjaveden lämpötilat vaihtelivat 1900-luvulla 2,2–8 °C välillä ja 2000-luvulla 2,2–10,1 °C välillä. Pohjaveden lämpötilaan vaikutti eniten Suomen sijainti pohjoisilla leveyspiireillä ja pohjaveden havaittiin noudattelevan maanpinnan keskilämpötilaa.</p> <p>Tutkimuksesta kävi ilmi, että Suomen matalapohjavettä voidaan hyödyntää sekä lämmitys- ja viilennysenergiana ympäri maata. Lämmitysenergiaksi pohjavesi sopii kuitenkin parhaiten maan eteläosissa. Lämpimimmät vedet löydetään Suomen lounaiselta rannikkoalueelta ja viileimmät Lapista. Lämpösaarekeilmiö voi kuitenkin kohottaa vesien lämpötilaa kaupungeissa ja siten lisätä energiapotentiaalia pohjoisemmillaakin alueilla.</p> <p>Koska matalapohjavesi on helposti tavoitettava ja runsaana esiintyvä uusiutuva luonnonvara Suomessa, tulisi se huomioida tulevaisuudessa entistä paremmin energialähteenä. Tulevaisuudessa Suomen pohjaveden lämpötilan tutkimusta voitaisiin jatkaa esimerkiksi kartoittamalla eri vuosikymmenten pohjaveden keskilämpötilat, jolloin voitaisiin selvittää pohjaveden lämpötiloissa tapahtunutta muutosta ajan suhteen.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords geoterminen energia, pohjavesi, lämpösaarekeilmiö			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Kumpulan kampuskirjasto			
Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information 23 kuvaa, 3 taulukkoa			

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Faculty of Science		Laitos/Institution– Department Department of Geosciences and Geography	
Tekijä/Författare – Author Sini Hietula			
Työn nimi / Arbetets titel – Title Temperature of shallow groundwater in Finland – the utility of national mapping to estimate geoenergy potential			
Oppiaine /Läroämne – Subject Geology			
Työn laji/Arbetets art – Level MSc thesis	Aika/Datum – Month and year December 2018	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages 50	
<p>Tiivistelmä/Referat – Abstract</p> <p>Concern of sufficiency of fossil fuels, rising prices of energy and the climate change together with the directives set by the European Union have increased the use of different forms of renewable energy both in Finland and around the world. Due to this, utilization of the geothermal energy has made a great increase. Geothermal energy means energy reserved in bedrock, soil and water system, and it can be used to both cooling and heating. Geothermal energy received from the groundwater has been started to utilize more than ever, and the temperature has a big role when utilizing the groundwater.</p> <p>The aim of this work is to map Finnish shallow groundwaters temperature distribution and to think over the utility of the mapping in estimating the geothermal energy potential of Finland. The hypothesis is that the temperatures decrease towards north and that the urban heat island, caused by urbanization, increases the temperatures of the groundwater in big cities. As the second aim is to analyse how the factors, such as the groundwater areas surface area, formation type and the quantity of forming groundwater, influence on the temperature of the groundwater.</p> <p>As the results of the work were three maps of Finnish shallow groundwater temperatures and the change of the temperatures in two different centuries. Temperatures had clearly increased in the 21st century compared to the 20th century. Reason for this seems to be, among other things, the climate change and urbanization. The groundwater temperatures varied between 2,2–8 °C in the 20th century and between 2,2–10,1 °C in the 21st century. Finland's location in northern latitudes caused the main influence on the groundwater temperature and the groundwater temperature was observed to follow the mean temperature of the ground.</p> <p>It turned out from the study that Finnish shallow groundwater can be utilized to energy source to both heating and cooling around the country. However, for heating energy the groundwater suits the best in the southern part of the country. The warmest waters can be found from the southwestern coast area of Finland and the coolest in Lapland. However, the urban heat island can raise the water temperature in cities and thus elevate the energy potential also in northern areas.</p> <p>As the shallow groundwater is easily available and abundant renewable natural resource in Finland its more efficient use as an energy source in the future should be considered. The study of the Finnish groundwater temperature could be continued for example by mapping the mean temperatures of groundwater in different decades when the change in the groundwater temperatures in respect of time could be defined.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords geothermal energy, groundwater, the "heat island" phenomenon			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Kumpula campus library			
<p>Muita tietoja – Övriga uppgifter – Additional information</p> <p>23 figures, 3 tables</p>			

Sisällysluettelo

1. JOHDANTO	4
2. SUOMEN POHJAVESIVARAT	5
2.1 Pohjavesivarat kallioperässä	8
2.2 Pohjavesivarat maaperässä.....	9
3. POHJAVESI ENERGIAN LÄHTEENÄ.....	10
3.1 Lämmönkeruu-järjestelmät	12
3.2 Ympäristökysymykset.....	14
4. AINEISTO JA TUTKIMUSMENETELMÄT.....	15
5. TULOKSET	18
5.1 Pohjaveden lämpötilakartoitus	18
5.2 Pohjaveden lämpötila 1900- ja 2000-luvulla.....	23
6. TULOSTEN TARKASTELU	26
6.1 Lämpötilaan vaikuttavat tekijät	29
6.1.1 Ilman lämpötila	30
6.1.2 Maanpinnan lämpötila	37
6.1.3 Lämpösaarekeilmiö	39
6.1.4 Akviferin ominaisuudet.....	42
6.2. Geoenergiapotentiaalin arviointi	44
6.3 Tulosten luotettavuus	47
7. JOHTOPÄÄTÖKSET.....	47
8. KIITOKSET	48
VIITELUETTELO	49

1. JOHDANTO

Ilmastonmuutos, huoli fossiilisten polttoaineiden ehtymisestä ja kohoavat energian hinnat ovat pakottaneet kehittämään uusia kestäviä energiaratkaisuja vanhojen energiamuotojen rinnalle. Lisäksi Euroopan unionin asettamat direktiivit ovat osaltaan vaatineet uusiutuvien energiamuotojen käytön lisäämistä. Keskeisimpiä päämääriä ovat direktiivin 2009/28/EY asettamat tavoitteet vuodelle 2020, jolloin uusiutuvan energian osuus energian loppukulutuksesta tulisi olla selvästi kohonnut EU:n alueella. Suomelle määrätty tavoite velvoittaa nostamaan uusiutuvan energian osuuden loppukulutuksesta 38 prosenttiin. Tämä osuus saavutettiin ensimmäistä kertaa vuonna 2014 (Tilastokeskus 2018) ja vuonna 2016 uusiutuvan energian osuus loppukulutuksesta oli jo 39 prosenttia (Suomen työ- ja elinkeinoministeriö 2018). Suomen työ- ja elinkeinoministeriön (2018) mukaan Suomen uusiutuvasta energiasta yli 60 % on peräisin metsäteollisuuden sivutuotteilla tuotetusta energiasta. Myös geotermisen energian käytön osuus kasvaa jatkuvasti, sillä se on ympäristöystävällinen, suhteellisen edullinen ja helposti saatavissa oleva energiamuoto, jota voidaan tehokkaasti hyödyntää tilojen lämmitykseen ja viilennykseen.

Geotermisellä energialla tarkoitetaan kallio- ja maaperään sekä vesistöihin, niiden pintasedimentteihin ja pohjavesiin varastoitunutta lämmitys- ja viilennysenergiaa, joka on peräisin auringon säteilystä sekä maan sisäosien tuottamasta lämmöstä (Banks 2012). Pohjavesien käyttö geotermisen energian lähteenä on kasvussa, mutta Suomessa sitä ei vielä hyödynnetä laajalti, vaikka potentiaalia olisi (Arola et al. 2014). Pohjavettä löydetään lähes kaikkialta ja se on helposti tavoitettavissa, mutta pohjaveden määrällä ja lämpötilalla voi olla rajoittava vaikutus sen käytössä. Lämpötilalla on keskeinen merkitys hyödynnettäessä pohjavettä energialähteenä tai juoma- ja talousvetenä (Benz et al. 2017). Lämpötila vaikuttaa paitsi pohjaveden geoenergiapotentiaalin, myös epäsuorasti lämpötilariippuvaisiin fysikaalisiin, kemiallisiin ja biologisiin prosesseihin, niiden vuorovaikutuksiin ja veden laatuun (Stauffer et al. 2014).

Tämän tutkielman pääasiallisena tarkoituksena on kartoittaa Suomen matalapohjaveden lämpötilajakauma, sekä pohtia kartoituksen käyttökelpoisuutta Suomen geoenergiapotentiaalin arvioinnissa. Aiemmissa tutkimuksissa Suomen luonnollisen pohjaveden lämpötilan on todettu vaihtelevan 3,5–6,6 °C:een välillä (Backman et al. 2009) ja lämpötilojen olevan korkeampia Eteläisessä-Suomessa ja laskevan kohti pohjoista-

Suomea. Tämän oletetaan näkyvän myös tehtävissä valtakunnallisissa kartoissa. Lisäksi pohjaveden odotetaan olevan lämpimämpää kaupungeissa kuin ympäröivillä luonnontilaisilla alueilla johtuen kaupunkialueilla esiintyvistä lämpösaarekeilmästä (Arola ja Korkka-Niemi 2014).

Työn toisena tavoitteena on analysoida pohjaveden lämpötilaan vaikuttavia tekijöitä, kuten esimerkiksi pohjavesialueen pinta-alaa, muodostumatyyppiä ja muodostuvan pohjaveden määrää. Pohjaveden lämpötila on noin 10 metrin syvyyteen saakka lauhkeassa ja lämpimässä ilmastossa yleensä sama kuin ilman keskilämpötila (Banks 2012). Tämä ei kuitenkaan päde Suomessa tai muualla boreaalisilla alueilla ja työn tarkoituksena on tutkia mitkä ja miten saatavilla olevat taustamuuttujat vaikuttavat matalapohjaveden lämpötilaan tutkittavalla alueella.

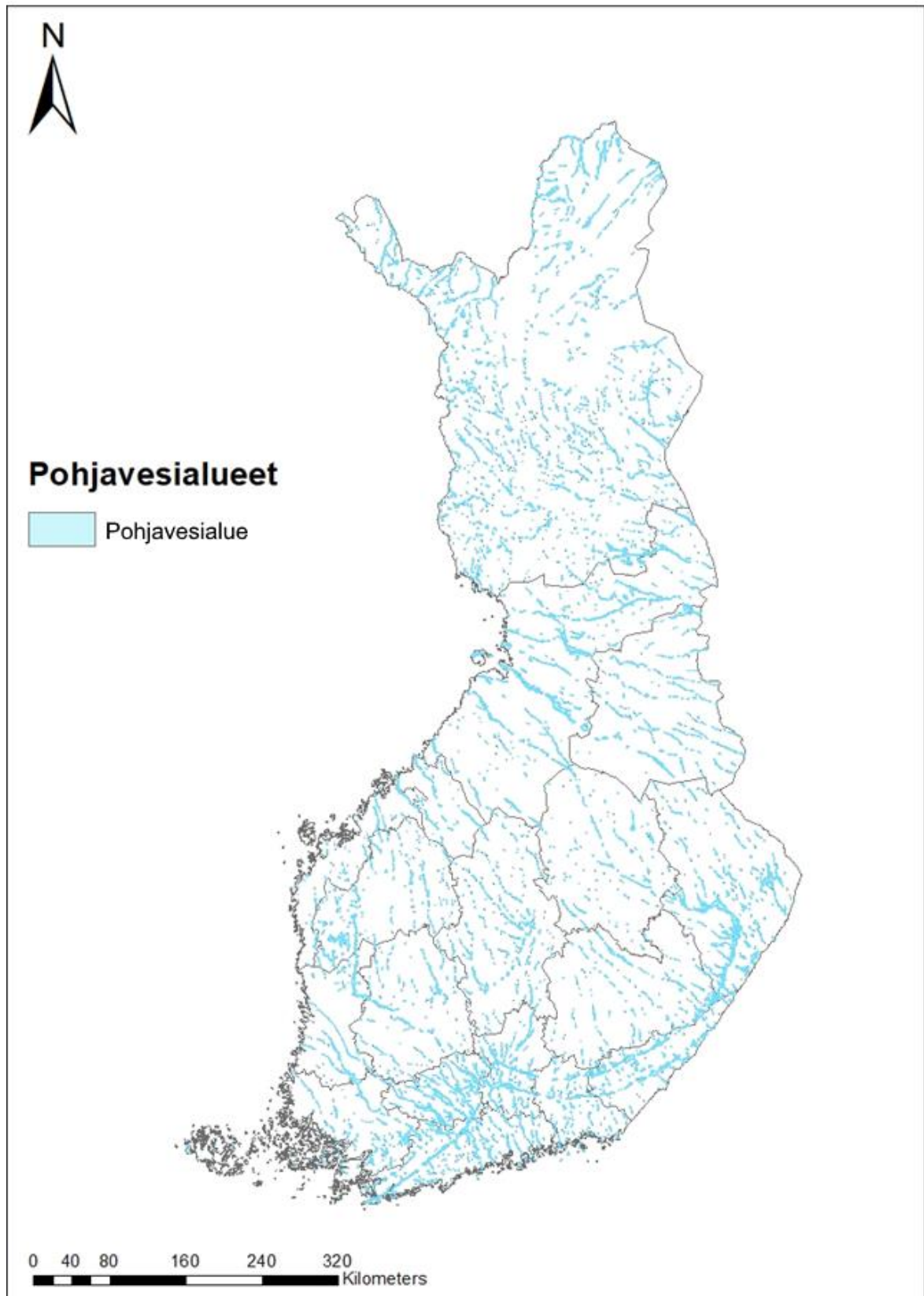
2. SUOMEN POHJAVESIVARAT

Pohjavesi on uusiutuva luonnonvara, joka muodostuu sateesta ja lumien sulamisvesistä, kun vesi suotautuu ja varastoituu maa- ja kallioperään. Pohjavesi muodostaa pohjavesimuodostumia eli akvifereja, jotka ovat pohjaveden kyllästämiä ja hyvin vettä johtavia maa- ja kallioperän vyöhykkeitä. Eniten pohjavettä muodostuu alueilla, joilla maalajit ovat karkearakeisia ja huokoisia, mutta myös kallioalueilla muodostuu pohjavettä, kun vesi suotautuu kallioperän rakoihin ja ruhjeisiin. Maapallon pohjavesivarastoista noin puolet sijaitsevat yli yhden kilometrin syvyydessä ja tällöin vettä ei voida sen laadun ja vaikean saatavuuden vuoksi hyödyntää vedenhankinnassa (Korkka-Niemi ja Salonen 1996). Vesivarannoista matalapohjavesivarat kattavatkin vain pienen osan, mutta niiden merkitys makean veden lähteenä on silti merkittävä.

Suomessa runsaan sadannan seurauksena pohjavettä muodostuu paljon, mutta sen määrä ja saatavuus vaihtelee alueittain hydrologisista ja geologisista tekijöistä johtuen. Maamme pohjavesivarat ovat hyvät, mutta joillakin alueilla hyödyntämiskelpoisesta pohjavedestä voi olla pulaa maaperän huonon vedenläpäisevyyden vuoksi. Suomen maaperä muodostuu useilla seuduilla savikoista ja tiiviistä moreenikerrostumista, jotka läpäisevät heikosti vettä ja joiden ominaisainepitoisuus on vähäinen (Korkka-Niemi ja Salonen 1996). Toisaalta Suomesta löydettävien glasifluviallisten hiekka- ja sora-akviferien vedenjohtavuus on suuri

ja sadannasta vettä voi imeytyä maahan 30–60 %. Tämä johtaa pohjaveden korkeaan hyödynnettävyyteen (Arola 2015). Kaiken kaikkiaan maamme pohjavesivarastot ovat hyvät ja ne riittäisivät jopa kymmenkertaiselle väestömäärälle (Korkka-Niemi ja Salonen 1996).

Ympäristöhallinnon luokittelemia pohjavesialueita oli Suomessa vuonna 2017 noin 6000 kappaletta (kuva 1). Ne on luokiteltu käyttökelpoisuutensa ja suojelutarpeensa perusteella kolmeen luokkaan, joista luokka I kattaa vedenhankintaa varten tärkeät pohjavesialueet, luokka II vedenhankintaan soveltuvat pohjavesialueet ja luokka III muut pohjavesialueet. Muodostuvan pohjaveden määrä yhteensä näillä pohjavesialueilla oli arviolta viisi miljoonaa m³ vuorokaudessa, käytettävän pohjaveden ja tekopohjaveden osuuden ollessa noin 0,7 miljoonaa m³ vuorokaudessa (Hertta-tietokanta 2017). Pohjavesialueet eivät ole jakautuneet tasaisesti ympäri maata ja noin kolmannes Suomen pohjavesialueista sijaitsee Lapin ELY-keskuksen alueella (Suomen ympäristökeskus 2018). Vähiten pohjavesialueita on Ahvenanmaalla sekä Pohjois- ja Etelä-Savon ELY-keskusten alueilla.



Kuva 1. Suomen pohjavesialueet. (Pohjakartat © Maanmittauslaitos 2017, Suomen ympäristökeskus 2017).

2.1 Pohjavesivarat kallioperässä

Suomen kallioperä on muodostunut joukosta eri kivilajeja, kuitenkin pääasiassa magmaattisista syväkivistä sekä metamorfisista kiteisistä gneisseistä ja liuskeista. Tyypillistä kallioperällemme on kivien huono vedenläpäisevyys ja primääristen huokosrakenteiden puuttuminen (Mälkki 1999). Vasta myöhemmät maankuoren liikkeet ovat aiheuttaneet rakoilua kallioperässä, varsinkin kallioperän ylimmällä 100 metrillä. Rakoilun tiheys ja luonne riippuvat kivilajista, mutta eniten rakoilevat happamat kivet, kuten graniitit (Korkka-Niemi ja Salonen 1996). Rapakivigraniitti, jota esiintyy enimmäkseen Ahvenanmaalla sekä Kaakkois- ja Lounais-Suomessa, omaa hiukan muita maamme kivilajeja paremman hydraulisen johtavuuden. Koska kivi rapautuu nopeasti, voi sen pintaosassa oleva rapautumiskuori olla suhteellinen paksu. Tämä kuori voi varastoida enemmän vettä kuin terve kallioperä. Rakoilu ja mikrorakoilu on rapakalliolla myös runsasta, mikä edesauttaa veden kertymistä kallioperään. Rapakivigraniitin lisäksi Satakunnan hiekkakivi johtaa tavallista paremmin vettä verrattuna muihin maamme peruskallion kiviin (Mälkki 1999).

Koska Suomen kallioperä ei ole kovin huokoinen, varastoituu kalliopohjavesi muun muassa erilaisiin rakoihin, halkeamiin, rikkonaisuusvyöhykkeisiin sekä kalliopinnan rapautumiskerrokseen (Korkka-Niemi ja Salonen 1996). Peruskalliossa esiintyvien ruhjeiden eli rikkonaisuusvyöhykkeiden pituudet voivat vaihdella muutamasta kymmenestä metrillä satoihin kilometreihin. Ruhjevyöhykkeiden avoimet raot ovat kapeita, alle millimetrin levyisiä ja ne ulottuvat syvemmälle kuin ehjässä kalliossa olevat raot. Ruhjeisiin varastoituu paljon pohjavettä ja ne muodostavat varsinaiset pohjavesialtaat kalliossa. Muodoltaan pohjavesialtaat ovat pitkänomaisia johtuen heikkousvyöhykkeiden luonteesta.

Suomen kallioperässä tyypillistä ovat pienet pohjavesialtaat, joita on maassa runsaasti. Muita tyypillisiä piirteitä ovat veden pieni syvyysulottuvuus, varastotilavuus sekä suurimmaksi osin pienialainen ja lyhytaikainen hydrologinen kierto. Maamme kallioporakajojen keskimääräinen syvyys on 60 metriä ja antoisuus $30 \text{ m}^3/\text{vrk}$ (Korkka-Niemi ja Salonen 1996). Rakojen esiintymistiheys pienenee mentäessä 100 metriä syvemmälle ja tästä syystä tätä syvempiä porakajoja ei kannata rakentaa. Kivilajilla ei ole suurta merkitystä kalliokaivojen antoisuuteen, mutta graniitin vaakarakoilu auttaa pohjaveden kerääntymistä (Korkka-Niemi ja Salonen 1996).

2.2 Pohjavesivarat maaperässä

Suomen olosuhteissa pohjavettä voidaan löytää maaperästä melkein kaikkialta vaihtelevilta syvyyksiltä riippuen geologisista ja topografisista tekijöistä. Pääsääntöisesti pohjaveden pinta löydetään sitä syvemmältä mitä parempi on kerrostuman vedenjohtavuus ja ominaisantoisuus. Tavallisesti pohjaveden pinta Suomessa löydetään noin 2-4 metrin syvyydeltä, mutta harjuissa ja reunamuodostumissa pohjaveden pinta voi ulottua jopa 50 metrin syvyyteen (Vienonen et al. 2012).

Suomen yleisin maaperän kerrostumatyyppi on moreenimaat, joilla vain 10–30 % sadevedestä imeytyy maahan pohjavedeksi moreenin huonon vedenjohtokyvyn takia. Pohjavedestä suurin osa on heikosti vettä moreenikerroksissa, joista pohjavettä saadaan useimmiten vain yksittäistalouksien käyttöön. Laajemmin hyödyntämiskelpoisia pohjavesiä voidaan löytää osittain lajittuneista, karkearakeisista kumpumoreeneista ja drumliineista (Korkka-Niemi ja Salonen 1996). Savikoiden sisältämä pohjavesi ei ole yleensä hyödyntämiskelpoista saven erittäin vähäisen ominaisantoisuuden vuoksi. Maamme parhaat pohjavesimuodostumat esiintyvät sen sijaan lajittuneissa hiekka- ja sorakerrostumissa, kuten harjuissa ja päätemoreeneissa, joiden pohjavesi on yleensä helposti saatavissa talousvesikäyttöön. Näissä muodostumissa jopa 30–60 % sadevedestä imeytyy pohjavedeksi. Suomessa tavattavat akviferit ovat yleensä vapaita akvifereja, mutta erityisesti Suomen eteläiseltä ja lounaiselta rannikkoalueelta löytyy myös akviferejä, joiden hiekka- ja sorasedimentit ovat kokonaan tai osittain savien peittämiä, jolloin muodostumista löydettävä pohjavesi voi olla paineellista salpavettä (Britschgi et al. 2009).

Salpausselkien reunamuodostumista löydetään Suomen laajimmat ja parhaimmat pohjavesivarat ja yksittäiset pohjavesimuodostumat voivat olla jopa kymmenien neliökilometrien laajuisia ja tuottoisimmilta vedenottamoilta voidaan pumpata vettä yli 10 000 m³/vrk (Korkka-Niemi ja Salonen 1996). Kalliokynnykset sekä huonosti vettä läpäisevät maakerrokset kuten savi ja moreeni rajaavat erillisiä pohjavesialueita. Pääasiassa yksittäiset pohjavesivarastomme ovat varsin pienikokoisia ja rikkonaisia. Esimerkiksi suuri osa harjuakvifereja käsittävistä pohjavesialtaista on pituudeltaan alle kaksi kilometriä (Mälkki 1999). Suhteellisen yleisiä ovat vielä 5-10 kilometrin pituiset altaatkin, mutta tätä suurempien pohjavesialtaiden määrää vähenee nopeasti altaan koon kasvaessa.

Maamme pinta-alasta noin 5 % on harjuja tai muita jäätikköjokikerrostumia, joissa tuottoisimmat pohjavesivarastomme sijaitsevat (Korkka-Niemi ja Salonen 1996). Myös Lapin tunturilaaksoista voidaan löytää merkittäviä pohjavesivaroja, jotka ovat muodostuneet hiekasta ja sorasta koostuviin laaksontäytteisiin ja särkkiin. Lisäksi etenkin Pohjanmaan rannikolta voidaan löytää rantakerrostumia, joista löytyy käyttökelpoisia mutta pieniä pohjavesivarastoja. Suomen olosuhteisiin nähden poikkeuksellisen laaja-alainen syväpohjavesiesiintymä on löydetty Kurikasta - esiintymästä löydetään vettä noin 100 miljoonaa kuutiota (Kytölä 2015). Tämä esiintymä on laatuaan ensimmäinen Suomessa, mutta samankaltaisia esiintymiä saatetaan tulevaisuudessa löytää lisää.

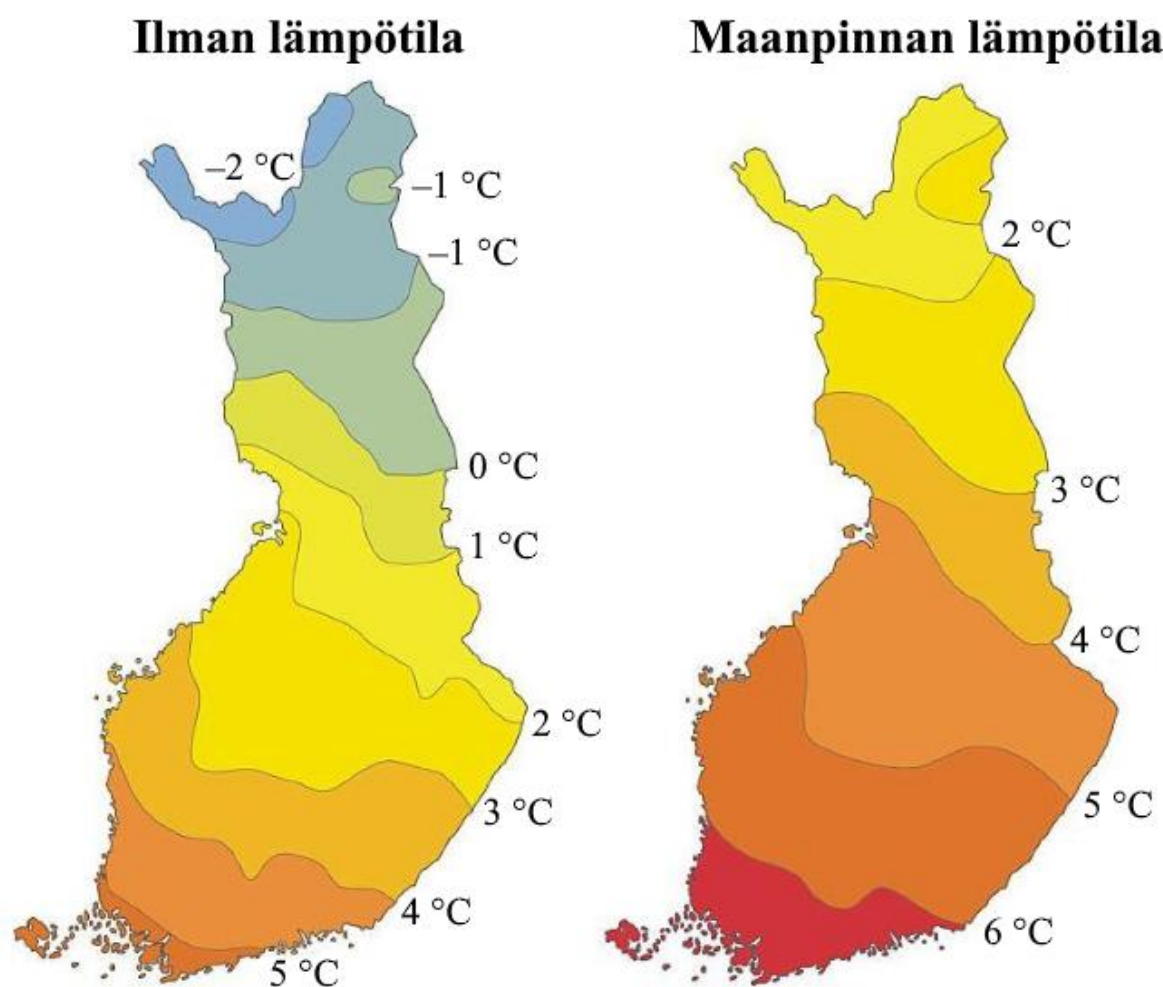
3. POHJAVESI ENERGIAN LÄHTEENÄ

Geoterminen energia on maa- ja kallioperään sekä vesistöihin, niiden pintasedimentteihin ja pohjavesiin varastoitunutta viilennys- ja lämmitysenergiaa (Juvonen ja Lapinlampi 2013), joka on peräisin auringon säteilyenergiasta ja maan sisäosien tuottamasta lämmöstä (Banks 2012). Se on uusiutuva luonnonvara, jonka hyödyntäminen on suhteellisen edullista ja saasteetonta (Xu et al. 2013). Geotermistä energiaa voidaan kerätä maa- ja kallioperästä ensimmäisen 400 metrin syvyydeltä (Hähnlein et al. 2013) ja sitä voidaan helposti hyödyntää rakennusten viilennykseen ja lämmitykseen (Arola ja Korkka-Niemi 2014).

Kiinnostus geotermistä energiaa kohtaan on kasvanut viime vuosina jatkuvasti monesta syystä niin Suomessa kuin maailmalla. Valtioita houkuttelee omavaraisuus energiasta (Hähnlein et al. 2010), mutta myös energian tuotannon korkea hinta, fossiilisten polttoaineiden aiheuttamat ympäristövaikutukset ja huoli niiden loppumisesta ovat lisänneet uusiutuvien energialähteiden, kuten esimerkiksi geotermisen energian, suosiota (Milenic et al. 2009, Stauffer et al. 2014). Euroopan Unionin asettamat direktiivit ovat myös osaltaan lisänneet geotermisen energian hyödyntämistä velvoittamalla valtioita nostamaan uusiutuvien energialähteiden käyttöä vuoteen 2020 mennessä.

Geotermisen energian hyödyntämistä suunniteltaessa tärkeä rooli on maanpinnan keskilämpötilalla (GTK, 2018). Suomessa maanpinnan vuotuinen keskilämpötila vaihtelee Pohjois-Suomen +2 °C:sta Etelä-Suomen +6 °C:een (Kukkonen 2000). Tämän johdosta

geotermistä energiaa voidaan hyödyntää käytännössä missä päin Suomea tahansa, kuitenkin Etelä-Suomessa Pohjois-Suomea paremmalla hyötysuhteella (GTK 2018). Maanpinnan lämpötilaan vaikuttaa voimakkaasti paikalliset ilmasto-olot ja yleisesti ottaen lämpötila riippuu leveyspiiristä, korkeudesta merenpinnasta, pohjaveden virtauksesta sekä paikallisesta geotermisestä lämpövuosta (Stauffer et al.2014, GTK,2018). Suomen pohjoisissa olosuhteissa maanpinnan keskilämpötila on melko alhainen, mutta siitä huolimatta noin kaksi astetta korkeampi kuin ilman keskilämpötila samoilla leveysasteilla (kuva 2). Maanpinnan lämpötilan on havaittu olevan rakennetuilla alueilla useita asteita korkeampi kuin maanpinnan lämpötilan luonnontilaisilla alueilla, mikä lisää geotermisen energian hyödyntämismahdollisuuksia (Juvonen ja Lapinlampi 2013).



Kuva 2. Maanpinnan ja ilman keskilämpötilat Suomessa vertailukautena 1971–2000. (Mukaillen Leppäharju 2008)

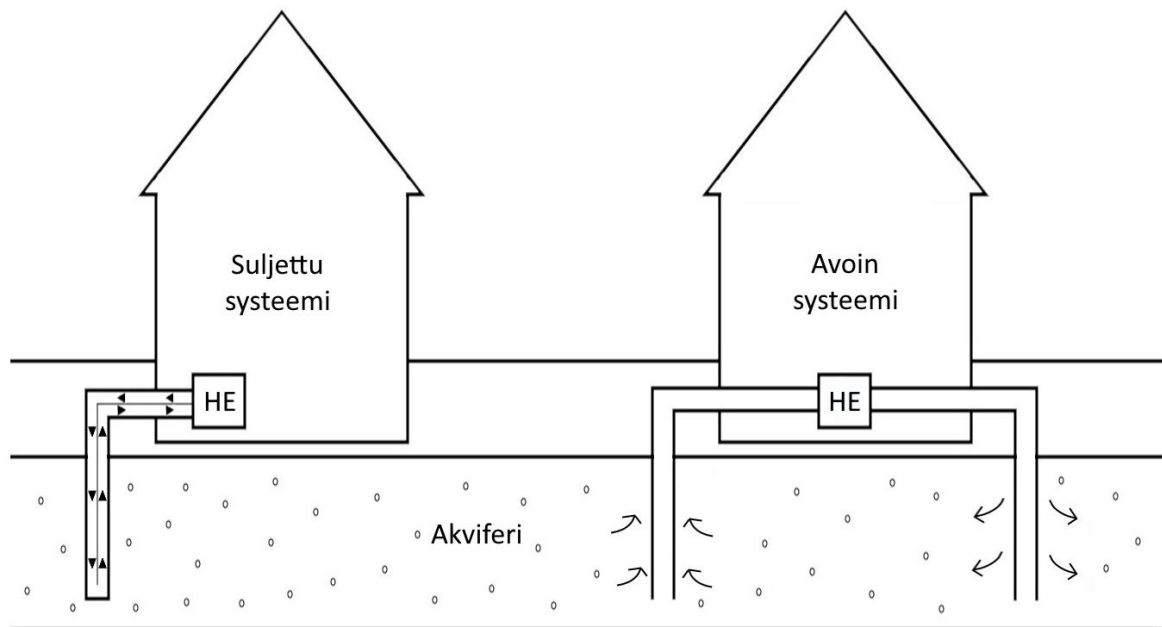
Yksi keino lisätä uusiutuvien energialähteiden käyttöä geotermistä energiaa hyödyntäen on matalapohjaveden käyttö energian lähteenä. Pohjavettä on käytetty onnistuneesti lämmitys- ja viilennysenergiana ympäri maailmaa, niin Euroopassa, Aasiassa kuin Pohjois-Amerikassakin. Arolan ja Korkka-Niemen (2014) mukaan matalapohjavesi sen sijaan ei ole yleisesti käytetty energialähde Suomessa, vaikka maamme glasifluviaaliset hiekka- ja sora-akviferit tarjoaisivat helposti hyödynnettävissä olevan energialähteen. Tunnetuin ja laajin pohjavesienergiaa hyödyntävä laitos Pohjoismaissa on Ruotsin Arlandan lentokenttä (Cabeza 2015), mutta pohjavedestä saatavaa energiaa käytetään paljon esimerkiksi myös Hollannissa, joka on yksi johtavista pohjavesienergiaa hyödyntävistä maista koko maailmassa (Bonte 2011).

Suomessa pohjavesivarat ovat suuret ja pohjavettä voidaan löytää ja hyödyntää helposti lähes kaikkialla maassamme. Vuonna 2017 Suomessa oli noin 6000 ympäristöhallinnon kartoittamaa pohjavesialuetta ja niissä muodostuvan pohjaveden määrä oli arviolta 5,4 miljoonaa m³ vuorokaudessa (Hertta-tietokanta 2017). Arolan ja Korkka-Niemen (2014) mukaan pohjavesialueista noin 800 sijaitsee asuin- tai teollisuusalueilla, joilla pohjavettä voitaisiin mahdollisesti hyödyntää energialähteenä. Suomen luonnontilaisen pohjaveden lämpötilan on aiemmin havaittu vaihtelevan maassa siten, että lämpötila on Lapissa +1,5–+3,5 °C, Oulun korkeudella +4–+4,5 °C ja Etelä-Suomessa +5,5–+7 °C (Lahermo et al. 1999). Rakennetuilla alueilla on voitu havaita maankamaran ja pohjaveden lämpötilojen kohoamista ympäröiviin luonnontilaiin alueisiin verrattuna (Arola ja Korkka-Niemi 2014).

3.1 Lämmönkeruu-järjestelmät

Eräs syy geotermisen energian maailmanlaajuiseen suosioon on sen perustuminen suhteellisen edulliseen ja yksinkertaiseen tekniikkaan (Milenic et al. 2009). Laitteistot, joilla geotermistä energiaa kerätään, voidaan jakaa yleisesti kahteen luokkaan: suljettuun ja avoimeen systeemiin (kuva 3). Suljetussa systeemissä lämmönsiirtonesteet kiertävät putkistossa kuljettaen geotermistä lämpöä maanpinnalle. Putket voidaan asentaa maahan horisontaalisesti tai vertikaalisesti paikallisista olosuhteista riippuen (Stauffer et al. 2014). Horisontaalisesti asennetut putket ylettävät yleensä noin 1-2 metrin syvyyteen ja vertikaalisesti asennetut noin 50–250 metrin syvyyteen (Milenic et al. 2009). Ympäristölle turvallinen lämmönsiirtoneste, esimerkiksi veden ja jäänestoaineen sekoitus, kiertää

putkiston läpi keräten lämpöä maasta talvella ja vieden lämpöä maahan kesällä (Stauffer et al. 2014).



Kuva 3. Geotermistä energiaa keräävät järjestelmät. Vasemmalla on suljettu systeemi, jossa lämmönsiirtoneste kiertää putkistossa keräten lämpöä maasta tai vieden sitä takaisin. Oikealla on avoin systeemi, joka hyödyntää pohjavettä geotermisen energian lähteenä. Kummassakin systeemissä lämmitys- tai viilennysenergia kerätään talteen lämpövaihtimella (heat exchanger) tai lämpöpumpulla. Mukaillen Haehlein et al. 2010.

Avoin systeemi hyödyntää pohjavettä geotermisen energian lähteenä. Koska systeemissä ei kierrätetä ympäristölle vierasta lämmönsiirtonestettä maankamarassa, on se suljettua systeemiä houkuttelevampi vaihtoehto ympäristön kannalta (Arola 2015). Systeemissä vesi kiertää kaivojen välillä, joista toinen on kylmä ja toinen lämmin (Stauffer et al. 2014). Kaivosta otettu vesi kulkee lämpöpumpun tai lämmönvaihtimen läpi, missä lämmönvaihtoprosessi tapahtuu ja viilennys- tai lämmitysenergia kerätään talteen (Bonte et al. 2011). Tapahtuman jälkeen lämmennyt tai viilennyt pohjavesi johdetaan takaisin maahan imeytyskaivon kautta, jolloin vesi vapautuu luonnolliseen kiertoon (Milenic et al. 2009). Avoin systeemi voidaan suunnitella toimimaan usealla eri tavalla. Laitteisto voidaan suunnitella joko lämmityskäyttöön talvella, viilennyskäyttöön kesällä tai yhdistettyyn kausiluontoiseen lämmön talteenottoon ja poistoon kaikkina vuodenaikoina (Stauffer et al. 2014). Systeemiä, jossa kaivojen tehtävät muuttuvat vuodenaikojen mukaan ja vesi voidaan varastoida ja käyttää tarpeen tullen, kutsutaan ATES (aquifer thermal energy storage)-järjestelmäksi (Kranz ja Frick 2013).

3.2 Ympäristökysymykset

Vaikka geotermisen energian hyödyntäminen on suhteellisen ympäristöystävällinen ratkaisu verrattuna esimerkiksi fossiilisiin polttoaineisiin, on pohjaveden käyttö energian lähteenä aiheuttanut myös huolenaiheita. Pelkona on muu muassa lämpö- tai viilennysenergian liiallinen hyödyntäminen, joka voi aiheuttaa maaperässä epänormaalia lämpenemistä tai jäähtymistä, ja johtaa monenlaisiin ongelmiin ympäristössä (Stauffer et al. 2014). Kun esimerkiksi viilennysenergiana käytetty pohjavesi pumpataan takaisin akviferiin, voi pohjaveden kohonnut lämpötila vaikuttaa epäsuotuisasti veden puhtauteen. Lämpötilan kohoamisen myötä joidenkin terveydelle haitallisten mikrobien lisääntyminen ja kulkeutuminen ympäristössä tehostuu, mikä voi vaikuttaa negatiivisesti veden laatuun (Briellmann et al. 2009). Jos lämpötila alenee pohjaveden lämmitysenergian käytön myötä, voivat veteen liuenneiden aineiden ja kaasujen tasapainoluvut muuttua. Esimerkiksi hiilidioksidin liukoisuus veteen voi lisääntyä ja tämän seurauksena karbonaattien määrä vedessä kasvaa (Stauffer et al. 2014).

Pohjaveden energiakäytöllä on todettu voivan olla myös ympäristölle suotuisia vaikutuksia, sillä esimerkiksi Arolan (2015) mukaan pohjaveden käyttö lämmitysenergiana saattaa vähentää kaupungistumisen aiheuttamaa pohjaveden lämpenemistä. Tällöin viileä pohjavesi voi olla etu, varsinkin jos vettä hyödynnetään käyttövetenä. Luonnontilaisen pohjaveden lämpötilasta poikkeava liian kylmä tai lämmin vesi voi kuitenkin muuttaa purkautumisalueen kasvillisuutta ja tätä myöten muodostaa riskin uhanalaisille lajeille (Arola 2015). Oikein toteutettuna pohjaveden hyödyntäminen lämmitys- ja viilennysenergiana on kuitenkin pitkäaikainen ja ympäristöystävällinen ratkaisu energian tuottamiseen (Stauffer et al. 2014). Useimmissa maissa ei ole vielä kattavia lainsäädäntöjä, jotka koskisivat geotermisen energian käyttöä (Haehnlein et al. 2010). Euroopan valtiot, erityisesti Suomi ja Liechtenstein, ovat kuitenkin paremmin säädeltyjä kuin monet muut valtiot.

Pohjavesienergiaa hyödyntävän järjestelmän käyttöönottoa suunniteltaessa pohjaveden lämpötilan lisäksi tulee huomioida useita muita tekijöitä ennen laitteistojen asennusta. Akviferin pohjavettä voidaan hyödyntää energiakäytön lisäksi juomavetenä, mikä tulee huomioida pohjavesisysteemiä hyödynnettäessä (Stauffer et al. 2014). Ennen laitteistojen asennusta tulee selvittää laitteistojen mahdolliset ympäristövaikutukset, eikä haittaa saisi aiheutua esimerkiksi naapurikiinteistöjen omistajille (Bridger ja Allen 2005, Stauffer et al.

2014). Suunnittelussa on tärkeä ottaa huomioon muun muassa kallio- ja maaperän rakenne ja ominaisuudet sekä pohjaveden määrä, virtaus, ja laatu (Milenic et al. 2009). Tärkeää on maankamaran hyvä vedenjohtavuus ja veden sopiva kemiallinen koostumus (Sanner et al. 2001).

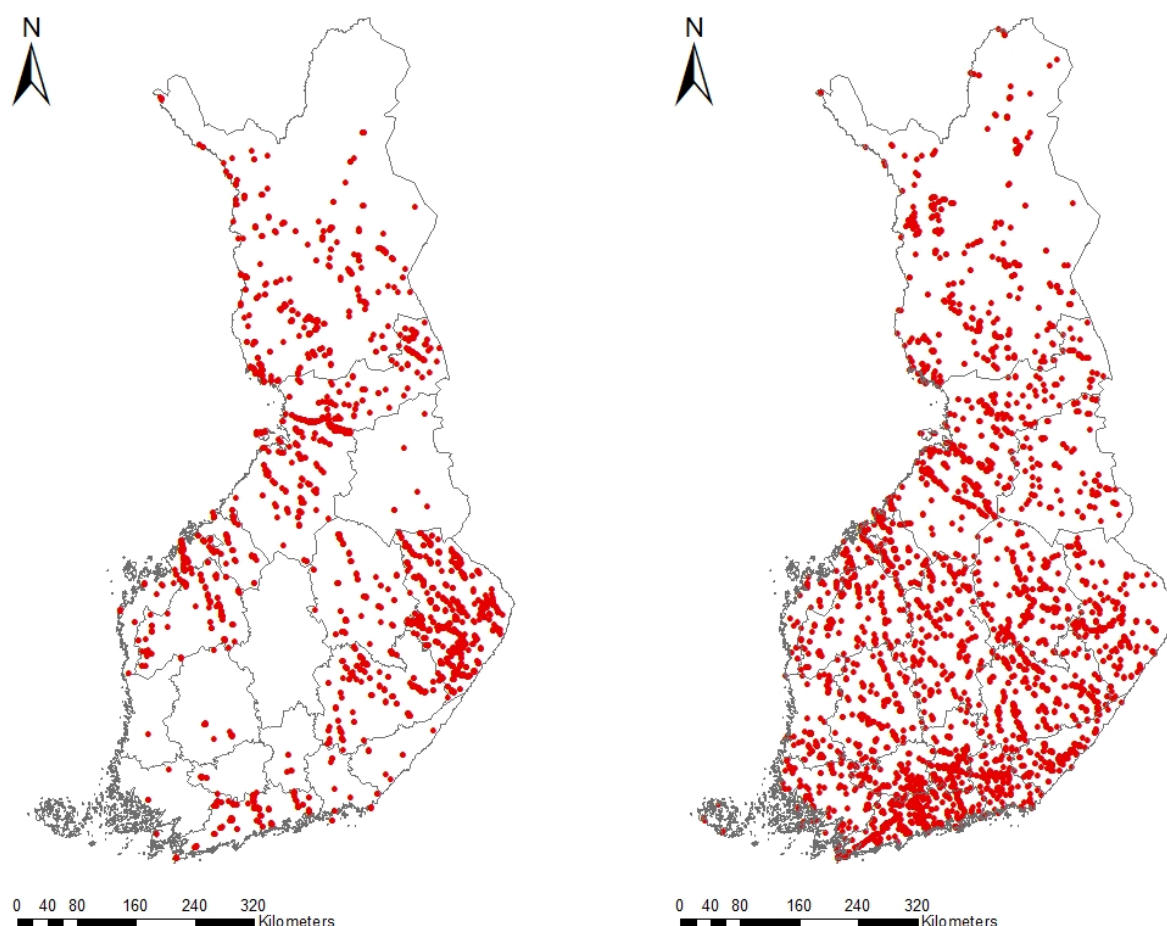
Suomessa akviferien vesi on kemiallisilta ominaisuuksiltaan yleensä sopivaa pohjavesienergiaa hyödyntäviin järjestelmiin, vaikka pohjavesien koostumuksessa on eroja eri puolilla maata (Arola et al. 2014). Korkeita Fe-, Mn- ja Cl-pitoisuuksia voi esiintyä varsinkin rannikkoalueiden savipeitteisissä paineellisissa akvifereissa (Korkka-Niemi 2001). Korkeat kloridi- ja sulfaattipitoisuudet rannikkoalueilla ovat seurausta vanhan Litorina-meren vaikutuksesta (Kinnunen 2005). Pohjavesien geokemiallinen koostumus voikin rajoittaa lämpöpumppujen käyttöä Suomen rannikkoalueilla (Arola et al. 2014). Esimerkiksi rauta ja mangaani voivat korkeina pitoisuuksina sakkautua ja tukkia putkistoa, kloridi puolestaan aiheuttaa korroosiota, joka aiheuttaa ongelmia vettä hyödynnettäessä (Sanner 2001). Myös Suomen pohjaveden melko matala lämpötila voi olla esteenä pohjavesienergian hyödyntämiselle (Arola et al. 2014). Kaupunkien aiheuttama maankamaran lämpötilan nousu voi kuitenkin parantaa pohjaveden lämmityspotentiaalia ja tätä myöten mahdollistaa pohjaveden käytön lämmitykseen alueilla, joilla pohjavesi on muuten luonnostaan kylmää (Arola 2015).

4. AINEISTO JA TUTKIMUSMENETELMÄT

Tutkimusta varten kerättiin tietoa Suomen matalapohjaveden lämpötiloista eri lähteistä ja tietokannoista. Aineisto on kerätty Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämästä Hertta-tietokannasta, ”Tuhat kaivoa – Suomen kaivovesien fysikaalis-kemiallinen laatu vuonna 1999” -kirjan aineistosta ja Teppo Arolan väitöskirjan ”Groundwater as an energy resource in Finland” aineistosta. Aineistoa on pyritty keräämään kattavasti koko Suomen alueelta, jotta saataisiin mahdollisimman laaja katsaus Suomen matalapohjaveden lämpötilasta ja sen vaihtelusta. Koska työssä käytetyt aineistot kerättiin kolmesta eri lähteestä, saatavilla olevan tiedon määrä vaihteli tietokannan mukaan. Eri tietokannoista saadut aineistot on kerätty eri ihmisten toimesta, eri aikoina ja eri paikoissa, joten mittausmenetelmät ja mittaustarkkuudet voivat vaihdella. Myös näytteenottovuosissa on isoja eroja, sillä aineistot ovat peräisin aina vuodesta 1960 vuoteen 2017 asti. Kerätty aineisto ei kata tasaisesti koko Suomea, joten

maakuntien kohdalla on eroja näytepisteiden määrissä ja etäisyyksissä, mikä voi heijastua lämpötilojen interpolointikarttoihin.

Havaintopisteitä kertyi hieman yli 7800 kappaletta, joista noin 5200 havaintoa on peräisin 2000-luvulta ja noin 2600 kappaletta 1900-luvulta (kuva 4). Näytepisteistä 7040 on peräisin Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämästä Hertta-tietokannasta, ja niistä 946 havaintopistettä on Uudeltamaalta, Varsinais-Suomesta 167, Hämeestä 407, Pirkanmaalta 208, Kaakkois-Suomesta 334, Etelä-Savosta 693, Pohjois-Savosta 270, Pohjois-Karjalasta 1045, Keski-Suomesta 150, Etelä-Pohjanmaalta 940, Pohjois-Pohjanmaalta 825, Kainuusta 115 ja Lapista 940. ”Tuhat kaivoa – Suomen kaivovesien fysikaalis-kemiallinen laatu vuonna 1999” -kirjasta havaintopisteitä saatiin yhteensä 550 kappaletta ja ne sijoittuvat varsin tasaisesti ympäri Suomea. Teppo Arolan väitöskirjasta ”Groundwater as an energy resource in Finland” saatiin 37 havaintoa Turun, Lohjan ja Lahden alueelta.



Kuva 4. Vasemmalla puolella oleva kartta kuvaa pohjaveden lämpötilojen havaintopisteiden (2600 kappaletta) sijainteja vuosina 1960–1999 ja oikealla puolella oleva kartta havaintopisteiden (5200) sijainteja vuosina 2000–2017. Havaintopisteet Arola (2015), Lahermo (1999) ja Hertta-tietokanta (2017). (Pohjakartat © Maanmittauslaitos 2017).

Matalapohjaveden lämpötilakartoitusta varten Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämästä Hertta-tietokannasta aineistot haettiin Ympäristö-ELY toiminnolla ja hakukriteeriksi rajattiin lämpötila. Saatavilla olevista tiedoista kirjattiin havaintopisteiden lämpötilojen minimi, maksimi ja keskiarvo, sekä pohjavesialueen pinta-ala, muodostuvan pohjaveden määrä ja akviferityyppi. Jos mittauksissa oli arvoja, jotka olivat epävarmoja, otettiin mukaan vain tarkat tarkistettut arvot. Mittaustuloksiin ei otettu lainkaan mukaan lysimetrihavaintoja tai luminäytteitä, koska niiden tarkkuudesta ei ollut varmuutta. Suurin osa näytteistä oli otettu pohjavesiputkista, joiden sijainnit ovat merkitty kartassa tarkoin koordinaatein. Mukana on myös kaivoista mitattuja lämpötilatietoja Lapin, Kainuun, Keski-Suomen ja Pirkanmaan maakunnista, mutta sijainnit ovat merkitty karttaan pohjavesialueittain ilman tarkkoja koordinaatteja. ”Tuhat kaivoa – Suomen kaivovesien fysikaalis-kemiallinen laatu vuonna 1999” -kirjan tuottamasta aineistosta osa karsittiin pois, koska ei ollut täyttä

varmuutta, olivatko näytteet mitattu suoraan kaivosta vai astian kautta, jolloin mittaustuloksen tarkkuudesta ei voitu olla täysin varmoja.

Lämpötilakarttoja tehtiin kolme, joista ensimmäinen kuvaa matalapohjaveden lämpötiloja 1900-luvulla, toinen 2000-luvulla ja kolmas kartta kuvaa lämpötilojen erotusta havaintosarjojen välillä. Karttojen laadinnassa hyödynnettiin Esrin ArcMap-ohjelmistoa. Lämpötiladata siirrettiin ohjelmaan havaintopisteiden koordinaattien perusteella. Herttatietokannasta kerätystä aineistosta kaivot ja lähteet ovat sijoitettu paikoilleen pohjavesialuetarkkuudella ja pohjavesiputket tarkkojen koordinaattien mukaan. Muista lähteistä saadut tiedot tarkkojen koordinaattien mukaan. Lämpötilakartta tehtiin interpoloimalla pohjavesien lämpötilat käyttäen ”Spatial analyst” – työkalua ja ”Kriging”-toimintoa, joka valittiin interpolointimenetelmäksi, koska se tasoittaa lämpötilojen ääriarvoja. Myös lämpötilojen erotus tehtiin ArcMap -ohjelmistolla käyttäen apuna työkalua ”Raster Calculator”. Rasterin solukooksi määriteltiin kaikissa kartoissa 1000 x 1000 metriä.

5. TULOKSET

5.1 Pohjaveden lämpötilakartoitus

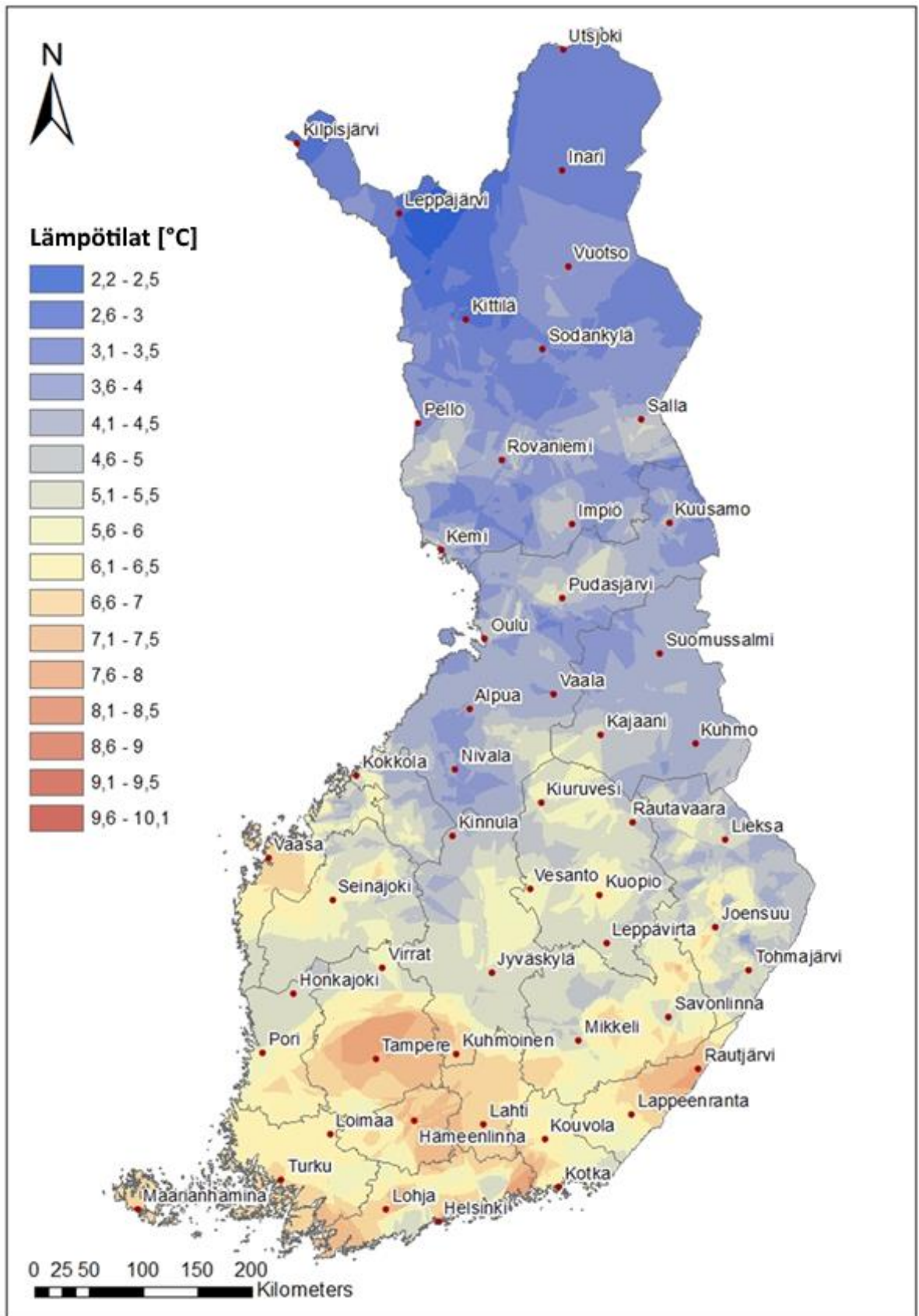
Työn tuloksena on kolme karttaa Suomen matalapohjaveden lämpötiloista ja niiden muutoksesta kahdella eri vuosituhanella. Ensimmäinen kartta kuvaa matalapohjaveden lämpötilojen keskiarvoa vuosina 1960–1999 ja toinen kartta lämpötiloja vuosina 2000–2017. Kolmannesta kartasta voidaan havaita matalapohjaveden lämpötilan muutos havaintosarjojen aikana.

1900-luvun matalapohjaveden lämpötila vaihteli 2,2–8 °C:een välillä siten, että lämpötilat ovat korkeimpia Etelä-Suomessa ja laskevat kohti Pohjois-Suomea (kuva 5). Lämpimintä vesi on Tampereella ja lähiseuduilla ja kylmimmät vedet löydetään Lapista, etenkin Käsivarren Lapin alueelta. Suurissa kaupungeissa, kuten esimerkiksi Helsingissä, Hämeenlinnassa, Tampereella, Vaasassa, Kuopiossa, Oulussa ja Rovaniemellä pohjaveden voidaan havaita olevan luonnontilaisten ympärysseutujen vesiä lämpimämpää. Keski-Suomesta ylöspäin vesi muuttuu vähitellen viileämmäksi. Itärajalta Rautjärveltä ja Imatralta löydetään huomattavasti ympärysseutujen vesiä lämpimämmän veden alue. Ongelmana

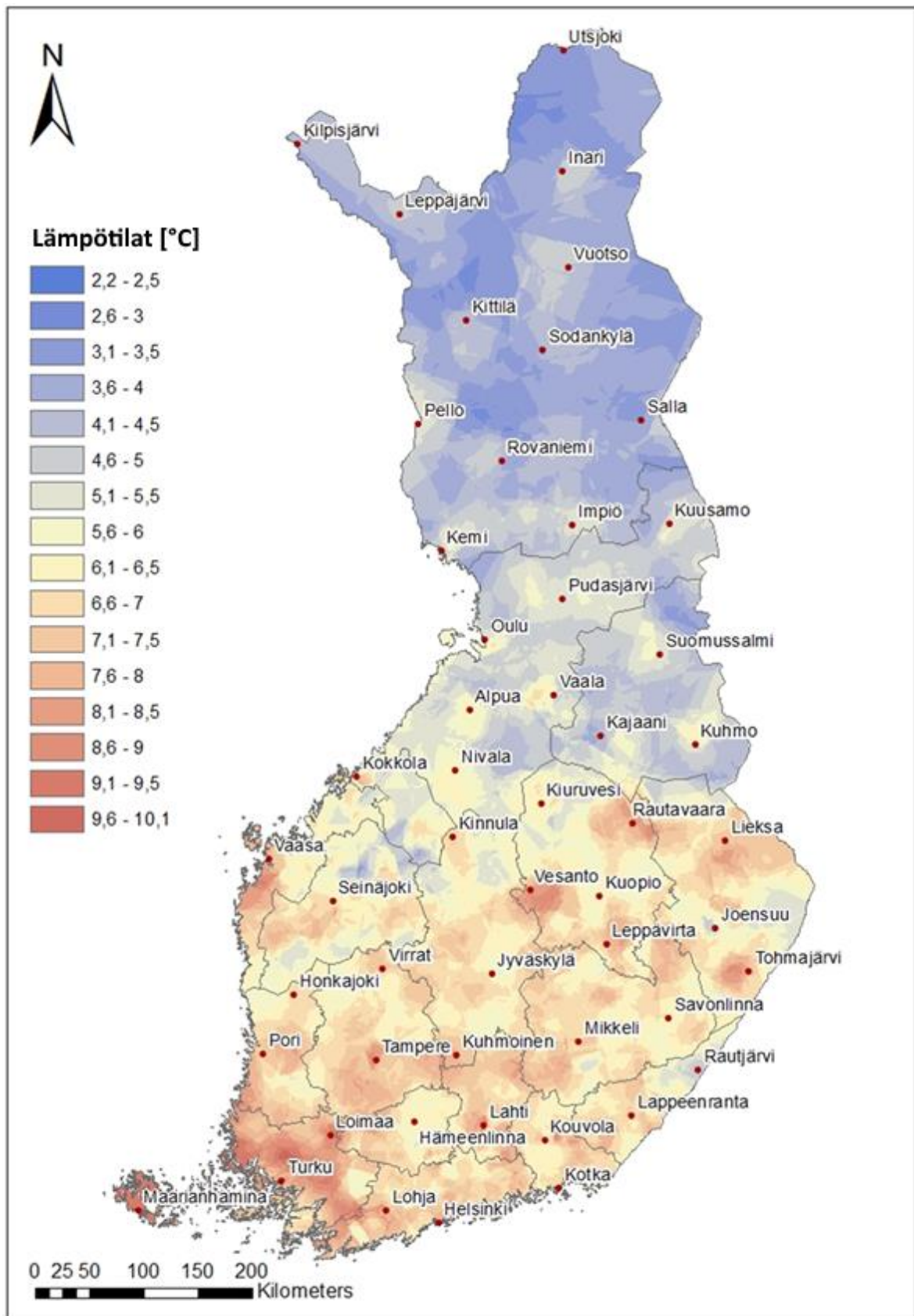
kuitenkin on havaintopisteiden varsin hajanainen ja epäsäännöllinen sijoittuminen kartalla, mikä voi vaikuttaa interpoloituihin tulokarttoihin.. Esimerkiksi Etelä-Karjalan maakunnasta löydetään vain muutamia havaintopisteitä, joten interpoloinnin voidaan olettaa vääristävän todellisia lämpötiloja hieman. Muita maakuntia, joissa havaintopisteitä on vain muutamia, ovat Kainuu, Keski-Suomi, Pirkanmaa, Satakunta, Varsinais-Suomi, Häme, Päijät-Häme ja Kymenlaakso.

2000-luvun matalapohjaveden lämpötilat ovat hieman korkeammat kuin 1900-luvun lämpötilat, sillä lämpötilat vaihtelivat 2000-luvulla 2,2–10,1 °C:een välillä (kuva 6). Lämpimimmät vedet ovat edelleen Etelä-Suomessa ja kylmimmät Lapissa. Yleisesti ottaen voidaan havaita lämpötilojen laskevan etelästä pohjoiseen ja lännestä itään mentäessä. Lämpimimmät vedet löytyvät Varsinais-Suomen maakunnasta ja kylmimmät Lapista. Vedet ovat lämpimiä varsinkin suurissa kaupungeissa, kuten esimerkiksi Turussa, Lahdessa, Tampereella, Vaasassa, Kokkolassa, Oulussa ja Rovaniemellä. Toisaalta joidenkin suurten kaupunkien alueella vesien huomataan olevan kylmempiä kuin ympäröivien alueiden pohjavesien. Tämä voidaan havaita muun muassa Kajaanissa ja Joensuussa. Tähän on todennäköisesti yhtenä syynä näytepisteiden harva ja hajanainen sijoittuminen kartalla, sillä näissä kaupungeissa ei ole otettu havaintoja pohjavesien lämpötiloista, ja tulokset kuvaavatkin enemmän ympäröivien maaseutualueiden pohjaveden lämpötiloja kaupunkien pohjaveden lämpötilojen sijaan.

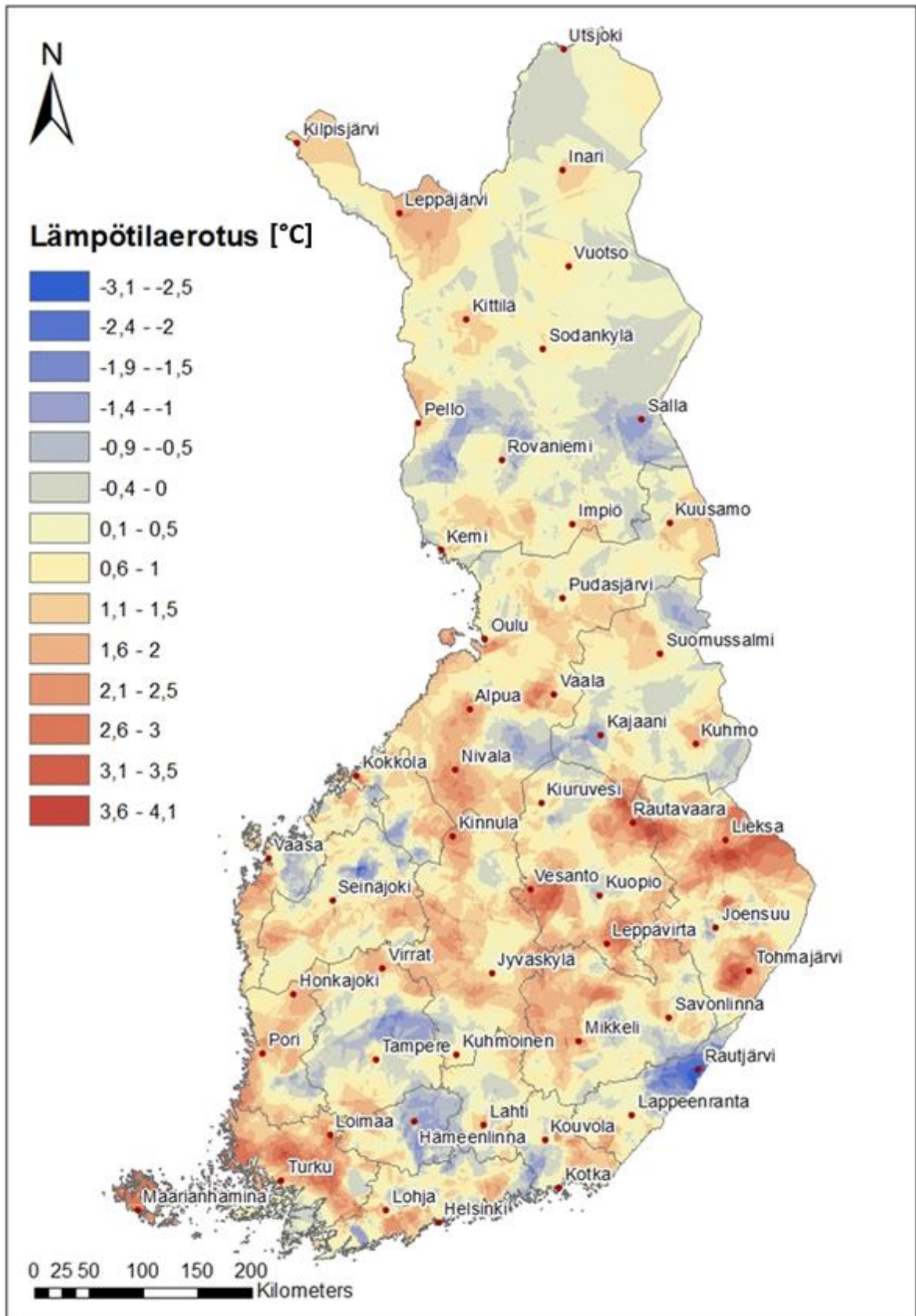
Suurimmat muutokset matalapohjaveden lämpötiloissa 1900- ja 2000 – luvun välillä ovat havaittavissa Itä- ja Keski-Suomessa sekä Lounais-Suomessa (kuva 7). Muualla Suomessa, etenkin Lapissa, erot ovat pienempiä. Eniten pohjavesi vaikuttaa lämmenneen Pohjois-Karjalassa, Pohjois-Savossa sekä Varsinais-Suomessa. Enimmillään vesien lämpötilat ovat kohonneet 4,1 °C:een verran Pohjois-Karjalassa ja enimmillään vedet ovat viilenneet -3,1 °C:een verran Etelä-Karjalassa. Yleisesti ottaen pohjaveden lämpötilat ovat kuitenkin kohonneet 1900-luvulta 2000-luvulle tultaessa lukuun ottamatta muutamia poikkeuksia ympäri Suomea. Tosin näytepisteiden vähyydestä ja hajanaisesta sijoittumisesta johtuen lämpötilojen vertailu ei ole kannattavaa kaikissa maakunnissa. Parhaiten lämpötilojen muutosta voidaan vertailla alueilla, joilla havaintopisteitä löydetään suhteellisen paljon sekä 1900- että 2000-lukua kuvaavissa kartoissa eli Lapista, Pohjois-Pohjanmaalta, Keski-Pohjanmaalta, Pohjanmaalta, Etelä-Pohjanmaalta, Uudeltamaalta, Pohjois- ja Etelä-Savosta sekä Pohjois-Karjalasta. Näistä maakunnista Pohjois-Karjalassa oli eniten havaintopisteitä sekä 1900- että 2000-luvulla.



Kuva 5. Matalapohjaveden keskilämpötilat Suomessa vuosina 1960–1999 perustuen Hertta-tietokannasta (2017) kerätyyn aineistoon. (Pohjakartat © Maanmittauslaitos 2017)



Kuva 6. Matalapohjaveden keskilämpötilat Suomessa vuosina 2000–2017 perustuen Hertta-tietokannasta (2017), Arolan (2015) väitöskirjasta ja Lahermon et al. (1999) kirjasta saatuihin tietoihin. (Pohjakartat © Maanmittauslaitos 2017)



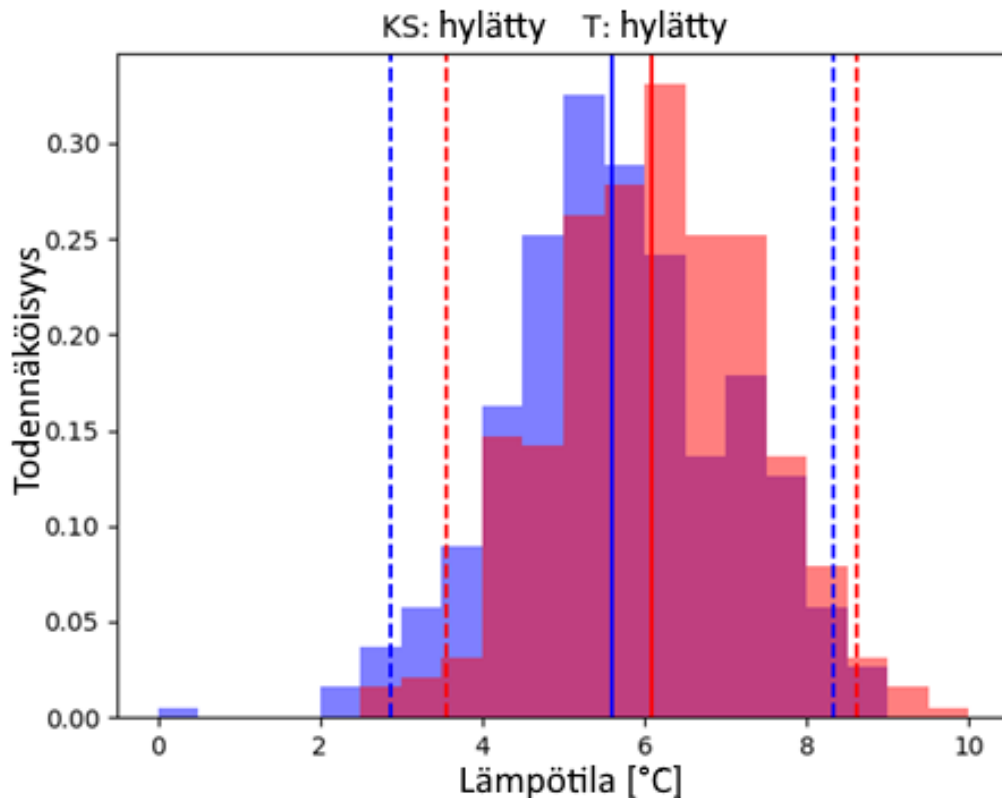
Kuva 7. Matalapohjaveden lämpötilan muutos vertailujaksojen 2000–2017 ja 1960–1999 välillä perustuen Herta-tietokannasta (2017), Arolan (2015) väitöskirjasta ja Lahermon et al. (1999) kirjasta saatuihin tietoihin. (Pohjakartat © Maanmittauslaitos 2017)

5.2 Pohjaveden lämpötila 1900- ja 2000-luvulla

Koska lämpötilakartoitusta tullaan käyttämään Suomen geoenergiapotentiaalin arvioimiseen sekä laskemiseen, selvitettiin onko laskennassa kannattavampaa käyttää vain 2000-luvun lämpötilatietoja vai myös keskimäärin matalampia 1900-luvun lämpötilatietoja. Etuna 2000-luvun lämpötilatietojen käyttämiseen on se, että aineistoon uudempaa. Jos myös 1900-luvun tiedot otetaan mukaan, on aineisto vanhempaa, mutta sitä olisi enemmän. Jotta saataisiin selville, mitä aineistoa olisi kannattavin käyttää, tuloksista etsittiin pisteet, joilla on samat koordinaatit sekä vanhassa 1900-luvun että uudessa 2000-luvun datasetissä. Pisteitä, joilla oli samat koordinaatit löydettiin yhteensä 381 kappaletta. Yhteensä vanhassa aineistossa oli pisteitä 2615 ja uudessa 5232, eli uudessa aineistossa oli näytepisteitä melkein kaksinkertainen määrä vanhaan aineistoon verrattuna. Vanhaa aineista kuvastaa sininen (dataset1) ja uutta punainen (dataset2) väri (kuva 8). Aineistojen keskiarvot, keskihajonnat sekä varianssit ovat seuraavat:

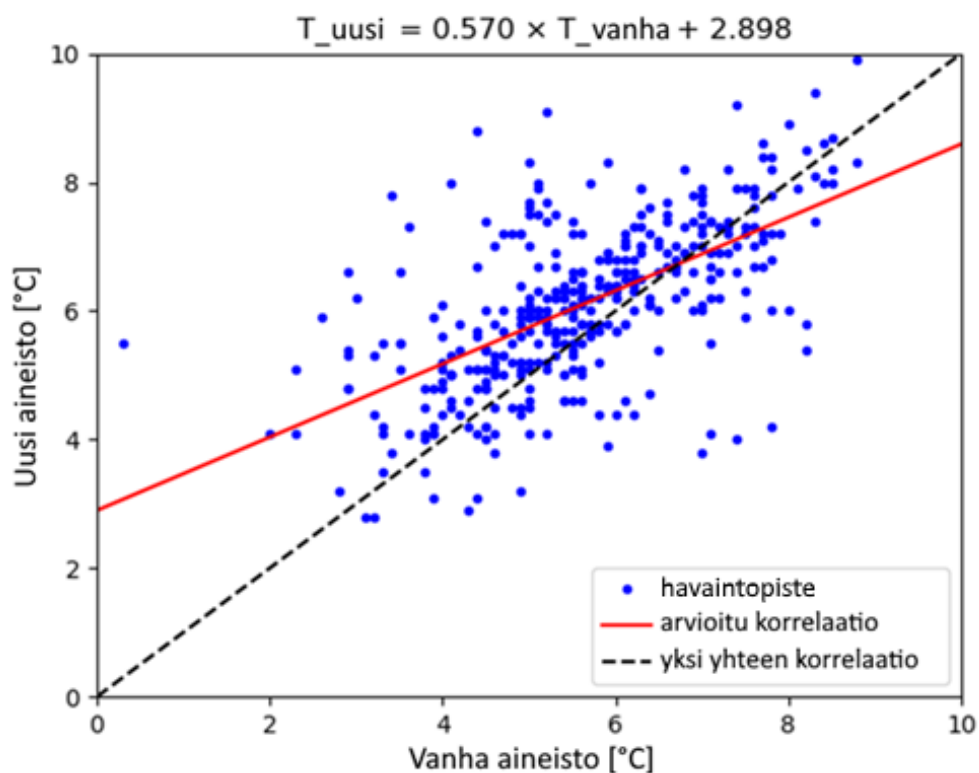
dataset1: mean=+5.598 std=1.364 var=1.860

dataset2: mean=+6.086 std=1.264 var=1.598

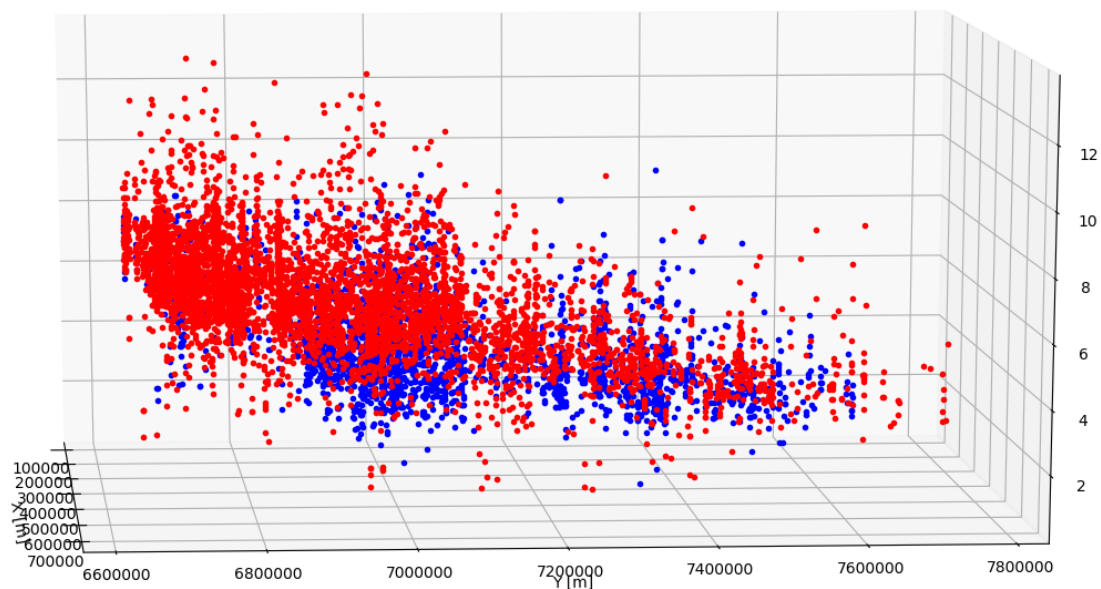


Kuva 8. Vertailujaksojen eli vuosien 1960–1999 ja 2000–2017 matalapohjaveden keskilämpötilojen keskiarvot, keskihajonnat ja varianssit. perustuen Hertta-tietokannasta (2017), Arolan (2015) väitöskirjasta ja Lahermon et al. (1999) kirjasta saatuihin tietoihin.

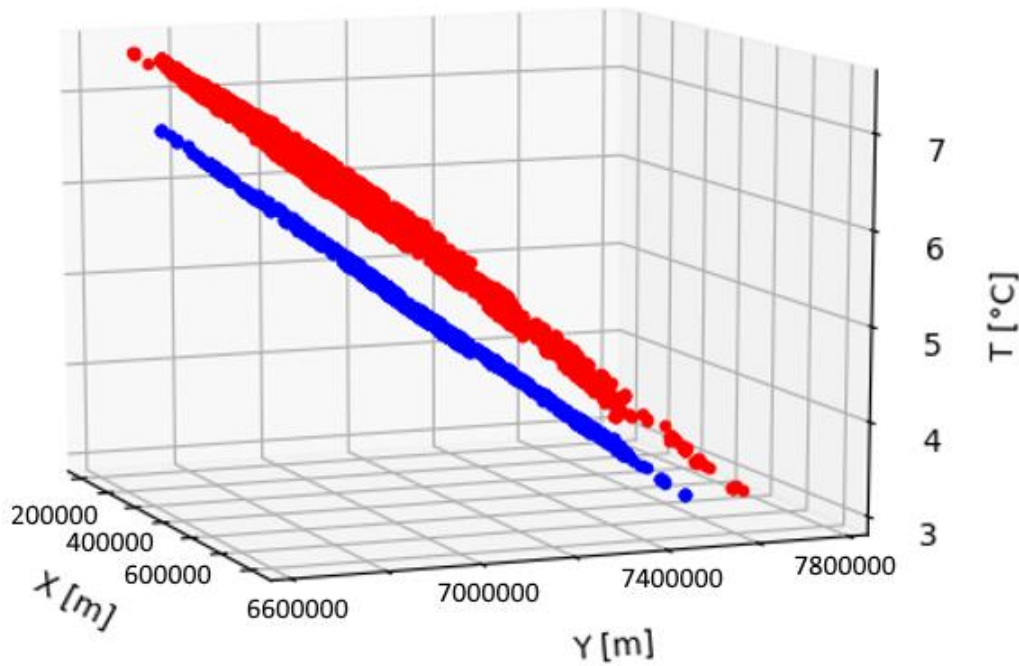
Tuloksista voidaan havaita uuden datasetin keskiarvon olevan vanhan datasetin keskiarvoa noin 0,487 astetta suurempi. Tuloksille tehtiin vielä kolme tilastollista testiä: Kolmogorov-Smirnov – testi sekä kaksi T-testiä. Testeistä kävi ilmi tilastollisesti merkitsevät erot, jolloin päädyttiin käyttämään ainoastaan uutta dataa. Tulosten perusteella uutta ja vanhaa datasettiä ei siis kannata yhdistää ja tämän seurauksena Suomen geoenergiapotentiaalin arviointia varten päädyttiin ottamaan mukaan ainoastaan 2000-luvun data. Regressiosuoralla voidaan havainnollistaa korrelaatiota uuden ja vanhan datasetin välillä (kuva 10). Eli yksi-yhteen – korrelaatio olisi mustan katkoviivan mukainen ($T_{\text{new}} = 1.000 * T_{\text{old}} + 0.000$). Datasta estimoitu korrelaatio on kuitenkin punaisen viivan kaltainen ($T_{\text{net}} = 0.570 * T_{\text{old}} + 2.898$).



Kuva 9. Korrelaatio vertailujaksojen, eli vuosien 1960–1999 ja 2000–2017, matalapohjaveden keskilämpötilojen välillä. perustuen Herttatietokannasta (2017), Arolan (2015) väitöskirjasta ja Lahermon et al. (1999) kirjasta saatuihin tietoihin.



Kuva 10. Vertailujaksojen, eli vuosien 1960–1999 ja 2000–2017, matalapohjaveden keskilämpötilojen havaintopisteet Suomessa 3D-mallina idästä katsottuna. perustuen Herttatietokannasta (2017), Arolan (2015) väitöskirjasta ja Lahermon et al. (1999) kirjasta saatuihin tietoihin.



Kuva 11. Vertailujaksojen, eli vuosien 1960–1999 ja 2000–2017, matalapohjaveden keskilämpötilojen havaintopisteiden sovitettu keskiarvopinta idästä katsottuna. perustuen Herttatietokannasta (2017), Arolan (2015) väitöskirjasta ja Lahermon et al. (1999) kirjasta saatuihin tietoihin.

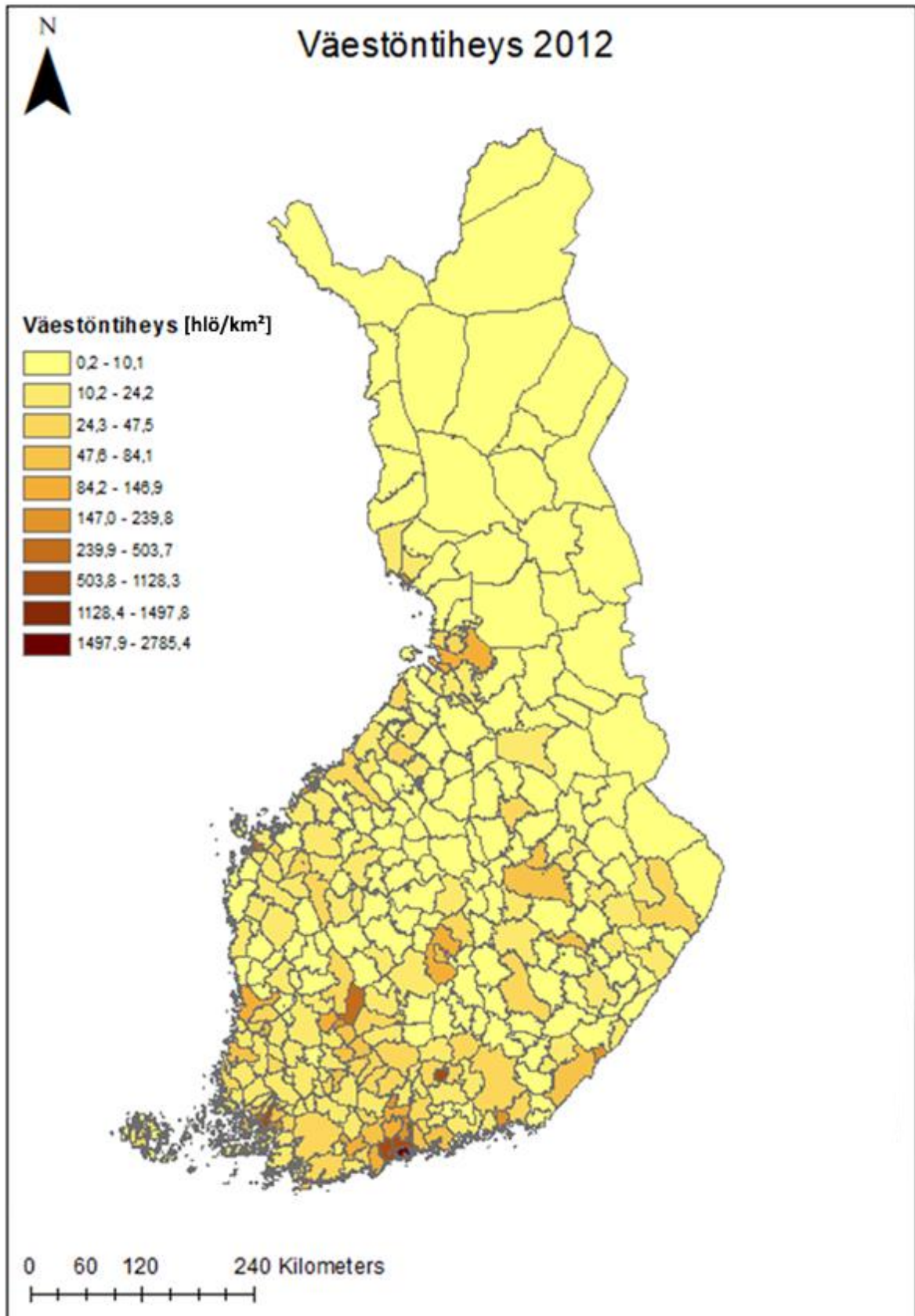
6. TULOSTEN TARKASTELU

Pohjaveden lämpötilan voitiin havaita viilenevän etelästä pohjoiseen ja lännestä itään mentäessä sekä 1900- että 2000-luvulla. Pohjaveden lämpötilan alenemiseen etelästä pohjoiseen mentäessä vaikuttaa ilmaston viileneminen sekä oletettavasti asukastiheyden väheneminen. Samoin myös lännestä itään mentäessä mahdollisia syitä lämpötilan alenemiselle voisi olla kaupunkien koon ja väestötiheyden väheneminen. Verrattaessa esimerkiksi 2000-luvun kartoista vuoden 2012 väestötiheyteen (kuva 12) voidaan havaita selkeä yhteneväisyys väestötiheyden ja korkeiden pohjaveden lämpötilojen välillä. Toinen mahdollinen syy lämpimämpiin matalapohjaveden lämpötiloihin lännessä on meren vaikutus. Meri leudontaa ilmastoa, joka edelleen voi vaikuttaa pohjaveden lämpötiloihin.

Suurin eroavaisuus 1900- ja 2000-luvun kartoitusten välillä oli Itä-Suomen suuri lämpötilaero. Lämpötilan havaitaan kohonneen huomattavasti Itä-Suomessa 1900-luvulta

2000-luvulle tultaessa. Yksi mahdollinen selitys kohonneille pohjaveden lämpötiloille on ilmastonmuutos. Ilmastonmuutoksen seurauksena Suomessa ilman vuosittaiset keskilämpötilat nousivat noin 0,7 °C 1990-luvun aikana (Carter 2007). Tämän työn perusteella pohjaveden lämpötilat nousivat noin 0,5 °C havaintosarjojen 1960–1999 ja 2000–2017 välillä. Lämpötilan nousu on suhteellisen sama kuin ilman lämpötilojen kohoaminen viimeisen sadan vuoden aikana. Pohjaveden lämpötila näyttääkin muuttuvan samaan tahtiin ilman lämpötilojen kohoamisen myötä. Toinen mahdollinen syy lämpötilan kohoamiseen alueella on havaintopisteiden määrä ja sijoittuminen. Itä-Suomesta, varsinkin Pohjois-Karjalan maakunnasta, on otettu enemmän havaintopisteitä 1900-luvulla kuin 2000-luvulla. Osaltaan pohjaveden lämpeneminen voisi selittyä sillä, että kaikilla alueilla ei ole ollut tasaisesti näytepisteitä, minkä takia lämpötilojen vertailu voi olla hankalaa. Jos havaintopisteet ovat esimerkiksi 2000-luvulla enemmän kaupunkien alueelle kuin 1900-luvulla, saattavat 2000-luvun kartoituksen lämpötilat näyttää tästä syystä korkeammilta. Havaintoja on otettu myös eri vuodenaikoina, mikä saattaa näkyä muita havaintoja korkeampina tai matalampina lämpötiloina. On myös mahdollista, että kaupungistuminen on vaikuttanut alueella voimakkaasti ja lämpötilat ovat todellisuudessaakin kohonneet.

Kartoituksessa on monia puutteita ja verratessa 1900-luvun ja 2000-luvun näytepistekarttoja toisiinsa, voidaan havaita, että 2000-luvun kartassa on huomattavasti enemmän näytepisteitä kuin 1900-luvun kartassa. 1900-luvun kartassa ei ole lainkaan näytepisteitä Keski-Suomesta ja myös monet muut maakunnat ovat huonosti edustettuja näytepisteiden osalta. Näiden maakuntien kohdalta lämpötilojen vertailu ei ole kovin mielekäästä, sillä tulokset voivat olla vääristyneitä. Tarkempaa tarkastelua voidaankin vain tehdä Uudenmaan, Pohjois-Karjalan, Pohjois-Pohjanmaan sekä Lapin maakunnissa. Muissa maakunnissa ei ole aineistoa riittävästi vertailun suorittamiseen.



Kuva 12. Väestötiheys Suomessa vuonna 2012. (Pohjakartat © Maanmittauslaitos 2018, Tilastokeskus 2018)

6.1 Lämpötilaan vaikuttavat tekijät

Pohjaveden lämpötila on vahvasti yhteydessä alueen ilmasto-oloihin, sillä pohjaveden ja ilman vuotuisten keskilämpötilojen on havaittu olevan lähellä toisiaan (Korkka-Niemi ja Salonen 1996). Päivittäiset ja vuotuiset pohjaveden lämpötilan vaihtelut ovat kuitenkin hyvin pieniä verrattuna ilman lämpötilojen vaihteluun (Mustonen 1986). Pohjavesi lämpenee ja viilenee hitaammin kuin ilma ja se varastoi hyvin lämpöä, joten pohjaveden vuodenaikaiset lämpötilamuutokset ovat havaittavissa viiveellä ilman lämpötilaan verrattuna (Korkka-Niemi ja Salonen 1996).

Yleensä pohjaveden lämpötila on likimain sama kuin ilman keskilämpötila noin 10 metrin syvyyteen asti lauhkeissa ja lämpimissä ilmastoissa (Banks 2012). Suomessa ja muualla boreaalisilla alueilla on kuitenkin havaittu vuotuisten pohjaveden keskilämpötilojen olevan korkeampia kuin vuotuisten ilman keskilämpötilojen (Arola ja Korkka-Niemi 2014). Esimerkiksi Etelä-Suomessa pohjaveden lämpötilan on havaittu olevan noin + 2 °C korkeampi ja Pohjois-Suomessa noin +4—+5 °C korkeampi kuin vuotuisen ilman keskilämpötilan (Lahermo et al. 1999). Arolan ja Korkka-Niemen (2014) mukaan tätä ilman ja pohjaveden välistä lämpötilaeroa korkeilla leveysasteilla selittää pääasiassa lumi ja routa. Lumi toimii talvisin eristeenä estäen kylmän ilman pääsyn maan pintakerrokseen. Talvisin maa myös routaantuu, jolloin maaperän veden olomuodon muutos vapauttaa latenttia lämpöä maankamaraan (McKenzie et al. 2007). Keväisin routa puolestaan toimii eristeenä estäen kylmien lumien sulamisvesien pääsyn syvemmälle maaperään (Mustonen 1986). Paikallisessa mittakaavassa pohjaveden lämpötilaan vaikuttavat useat muutkin tekijät, kuten muun muassa lämpösaarekeilmiö (Ferguson ja Woodbury 2007), maan lämpövuoto (Banks 2012), pohjaveden virtaus maaperässä sekä pohjaveden syvyys (Fan et al. 2013).

Koska boreaalisilla alueilla pohjaveden lämpötila ei ole sama kuin ilman keskilämpötila, on yhtenä työn tarkoituksena tutkia mitkä ja miten saatavilla olevat taustamuuttujat vaikuttavat matalapohjaveden lämpötilaan tutkittavalla alueella. Tässä työssä on tarkasteltu vain muutamia mahdollisia lämpötilaan vaikuttavia tekijöitä. Tarkemmin tarkasteltiin muun muassa ilman sekä maanpinnan lämpötilojen, lämpösaarekeilmiö ja akviferin ominaisuuksien vaikutusta matalapohjaveden lämpötiloihin Suomessa. Taustamuuttujien vaikutusta tarkasteltiin ainoastaan 2000-luvusta tehtyyn matalapohjaveden lämpötilakartoitukseen, koska sen avulla tullaan tulkitsemaan Suomen pohjaveden geoenergiapotentiaalia.

6.1.1 Ilman lämpötila

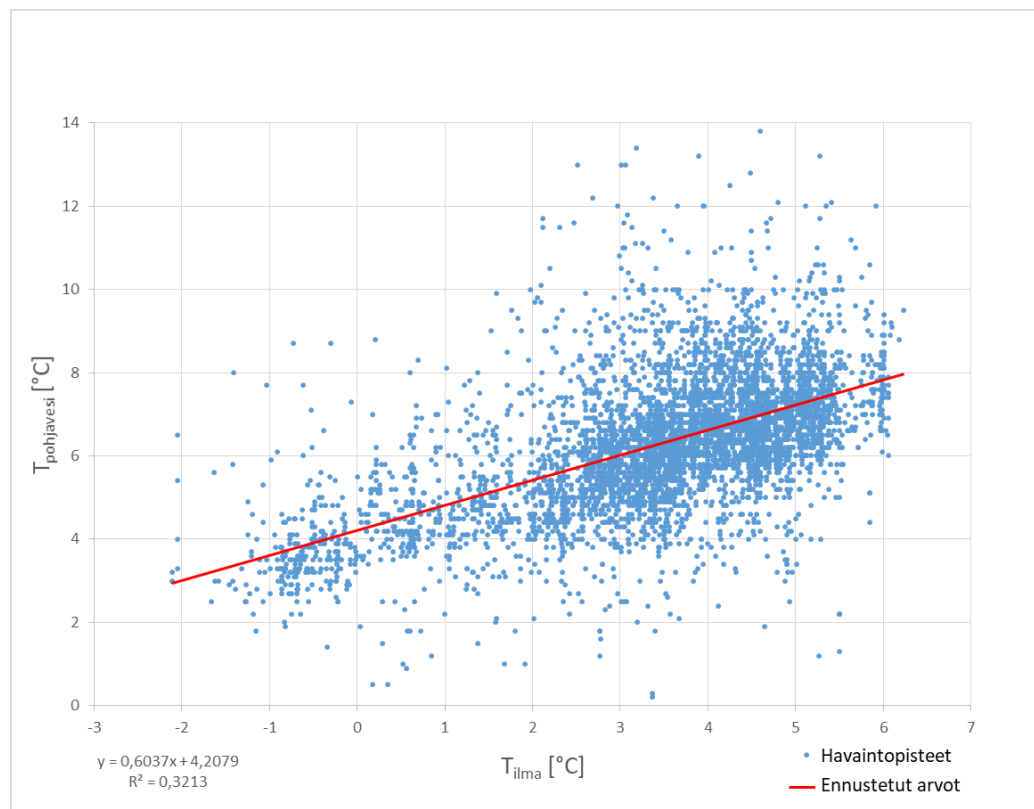
Kuten aiemmin on todettu, boreaalisilla alueilla, kuten Suomessa, pohjaveden lämpötila ei ole sama kuin ilman keskilämpötila. Yhtenä työn tarkoituksena onkin tutkia onko pohjaveden lämpötila johdettavissa ilman lämpötilasta. Tämän selvittämistä varten 2000-luvun pohjavesikartoituksen lämpötiladataa sekä Ilmatieteenlaitoksen palveluista saatua ilman keskilämpötilakarttaa vuosilta 1981–2010 verrattiin toisiinsa (kuva 13). Lämpötilojen vertailua varten ilman keskilämpötilakartasta otettiin lämpötilat samoille näytepisteille, joille löytyi pohjaveden lämpötilan mittaustulos (n=7800). Pohjaveden lämpötila ennustettiin ilman lämpötilasta (kaava 1) seuraavasti:

$$T_{\text{pohjavesi}} = a * T_{\text{ilma}} + b \quad (\text{kaava 1})$$

Tulokseksi saatiin kertoimet a ja b ja niille seuraavat virherajat:

$$a = 0,604 \pm 0,012$$

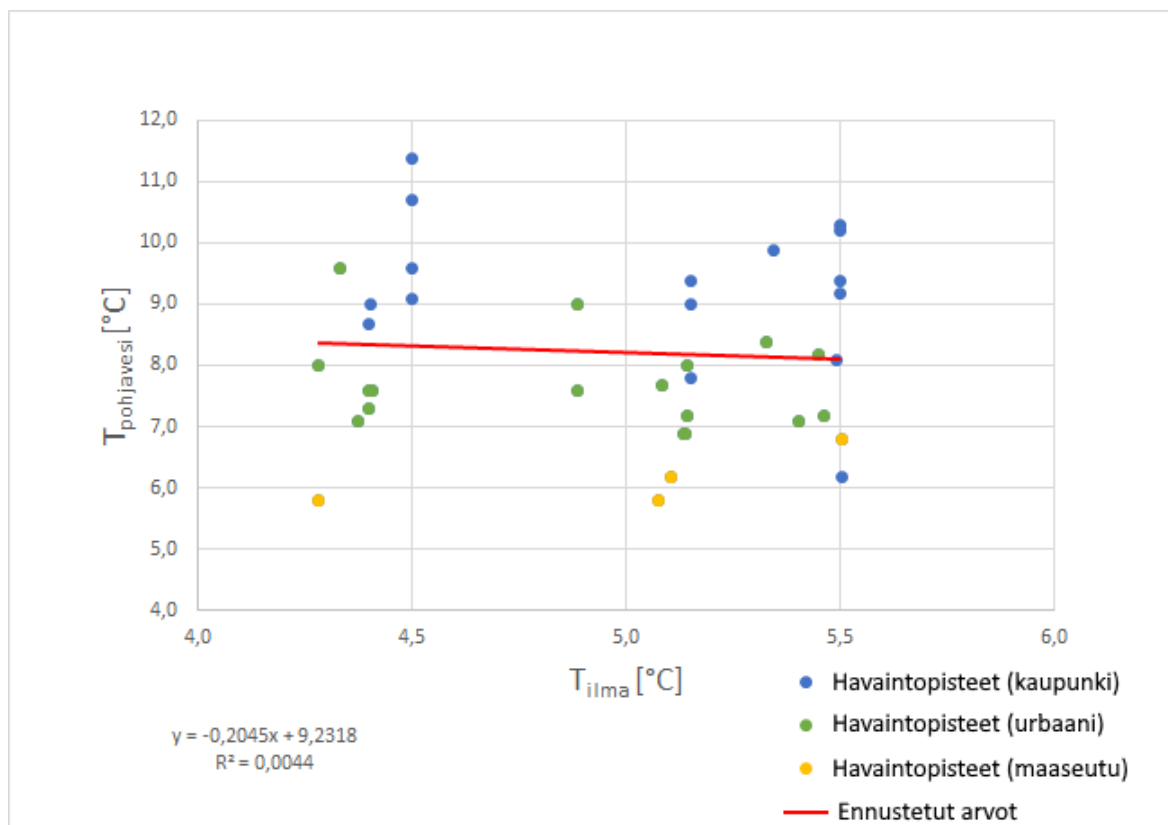
$$b = 4,208 \pm 0,046$$



Kuva 13. Ilman (vertailujakso 1981–2010) ja matalapohjaveden (2000–2017) sirontakuvio ja regressiosuora.

Kuvaa tarkasteltaessa voidaan havaita hajonnan olevan varsin suuri. Hajontaa voi osaltaan selittää se, että pohjaveden lämpötila on yksi mittaus jollakin ajanhetkellä. Jos tämä lämpötila on mitattu läheltä maanpintaa, se muuttuu vuodenajan funktiona eikä se ole tällöin vuotuinen keskiarvo. Jossain havaintopisteessä on voitu ottaa useita mittauksia eri vuodenaikoina, kun taas toisessa pisteessä on saatettu ottaa vain yksi näyte vuodessa. Jos esimerkiksi havaintopisteessä on otettu vain yksi näyte jonakin vuodenaikana, se voi mahdollisesti näkyä kuvaajassa muuta dataa kylmempänä tai lämpimämpänä pisteenä lisäten hajontaa. Pohjaveden ja ilman lämpötilat eivät myöskään ole peräisin samoilta vuosilta, mikä voi aiheuttaa epätarkkuutta tuloksissa. Pohjavesien lämpötilat ovat vuosilta 2000–2017, mutta aineiston saatavuudesta johtuen ilman lämpötilat ovat vuosilta 1981–2010. Vuodet eivät siis vastaa toisiaan täysin.

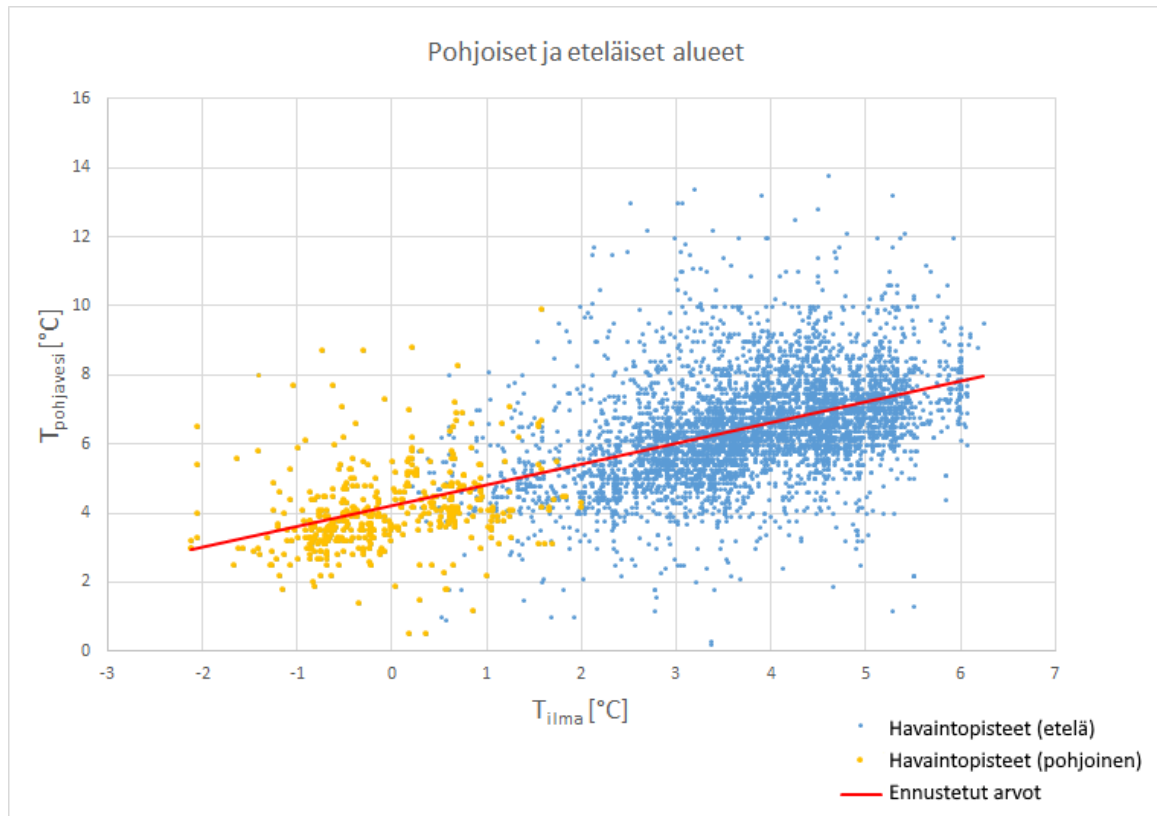
Yksi mahdollinen selitys suurelle hajonnalle on kaupunkien lämpösaarekeilmiö, jonka vaikutusta hajontaan tutkittiin pienemmän otannan kautta. Aineistona käytettiin Teppo Arolan väitöskirjan ”Groundwater as an energy resource in Finland” tietoja (kuva 14). Turun, Lohjan ja Lahden alueiden 37 näytepisteen pohjavesitiedot ovat jaoteltu maankäytön mukaan kaupunki-, urbaani- ja maaseutu-alueisiin.



Kuva 14. Ilman (vertailujakso 1981–2010) ja matalapohjaveden (2000–2017) sirontakuvio ja regressiosuora Turussa, Lohjalla ja Lahdessa.

Kaavio ja korrelaatiot poikkeavat koko Suomen kattavasta kaaviosta, mutta myös otanta on pienempi. Eduksi Turun, Lohjan ja Lahden alueen kaavalle on se, että kaikki näytteet on otettu saman henkilön toimesta ja samana vuonna, joten tiedot ovat luotettavampia. Tuloksena saatiin kaava seuraavaan muotoon: $T_{\text{groundwater}} = -0,2045 * T_{\text{air}} + 9,2318$. Kuvaajaa tutkittaessa voidaan huomata lämpösaarekeilmion olevan havaittavissa selkeästi. Kaupunkialueiden havaintopisteet ovat nähtävissä kuvaajasta muita havaintopisteitä lämpimämpinä pisteinä, maaseutualueiden pisteet puolestaan kylmempinä. Parhaiten suoralle osuvat kaupunkialueiden havaintopisteet.

Työssä selvitettiin myös vaikuttaako kuvaajan suureen hajontaan näytepisteiden sijainti Suomen eteläisillä ja pohjoisilla alueilla (kuva 15). Koko Suomen kattava aineisto jaettiin kahteen osaan: pohjoiseen ja eteläiseen. Pohjoisen ja etelän jakajana käytettiin Napapiiriä. Kuvaajasta voidaan huomata, ettei eteläisten ja pohjoisten alueiden jaottelulla ole vaikutusta kuvaajan suureen hajontaan.

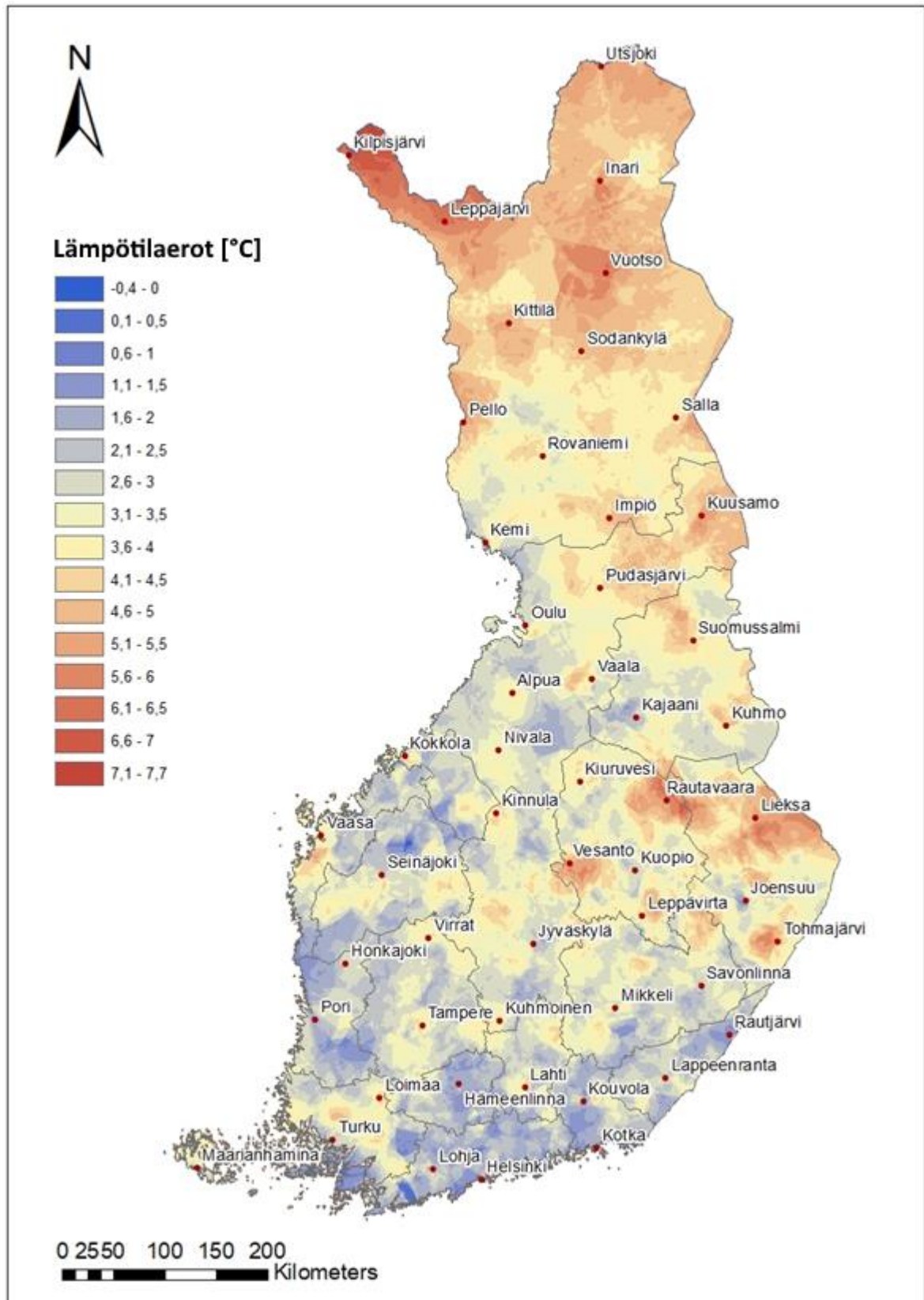


Kuva 15. Suomen pohjoisten ja eteläisten alueiden sirontakuviot ja regressiosuorat.

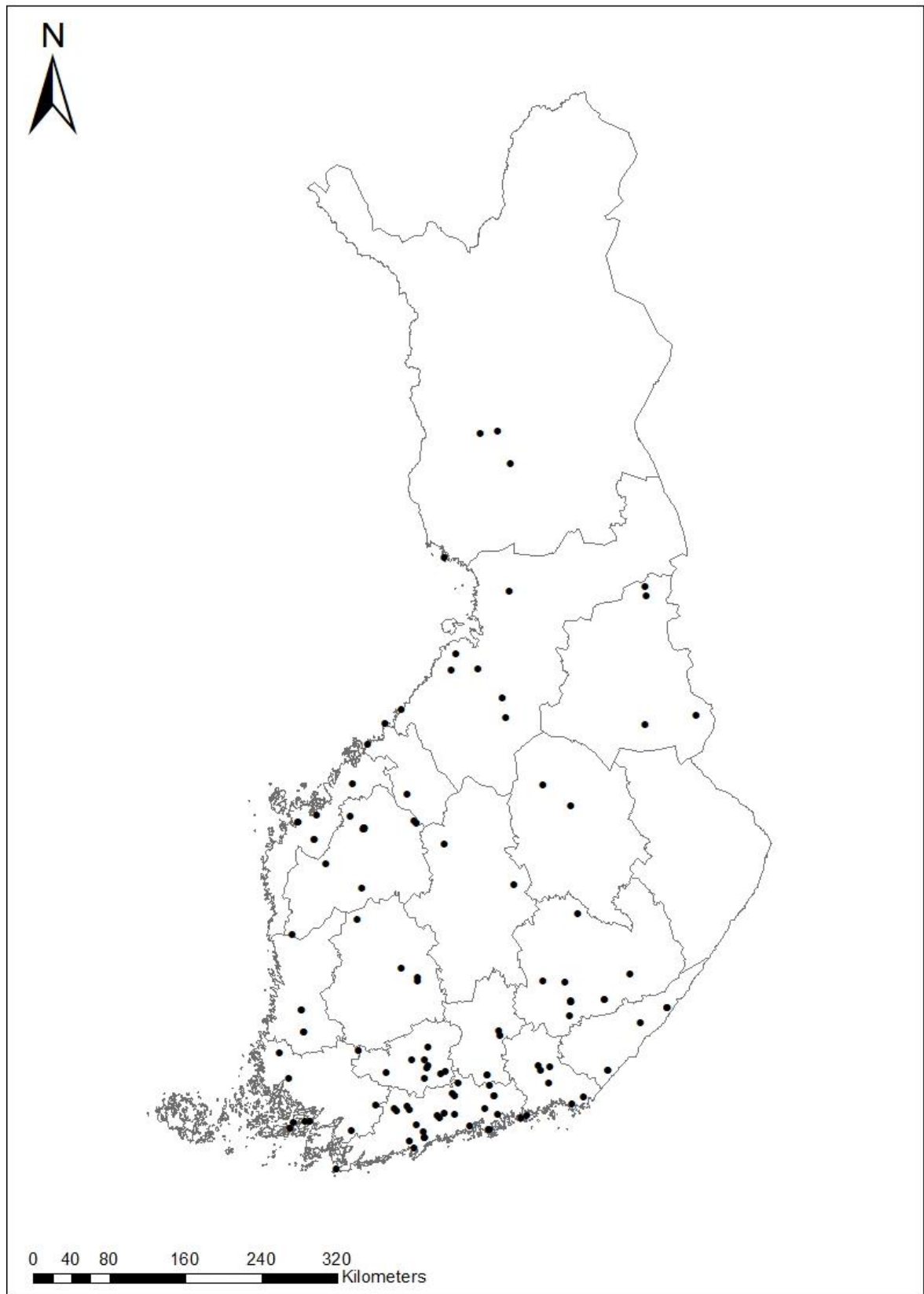
Jotta pystyttäisiin vielä paremmin tarkastelemaan sitä, millä alueilla sekä miten ilman ja pohjaveden lämpötilat eroavat toisistaan, tehtiin pohjaveden ja ilman keskilämpötilojen erotuskartta (kuva 16). Pohjaveden lämpötilakarttana käytettiin kartoitusta varten tehtyä pohjaveden lämpötilakarttaa vuosilta 2000–2017 ja ilman lämpötilakarttana ilmatieteenlaitoksen palveluista saatua karttaa, jossa ilmenee ilman keskilämpötila vuosilta 1981–2010.

Kartasta voidaan havaita pohjaveden lämpötilojen olevan ilman lämpötiloja huomattavasti lämpimämpiä etenkin Lapissa, missä pohjaveden lämpötilat ovat enimmillään jopa 7 °C ilman lämpötiloja korkeampia. Erot pienenevät kohti Etelä-Suomea ja suuressa osassa maata lämpötilat eroavat toisistaan vain puolen asteen verran suuntaan tai toiseen. Etelä-Suomessa pohjaveden keskilämpötila vastaa suhteellisen hyvin ilman keskilämpötilaa. Itä-Suomessa pohjaveden lämpötilat ovat korkeampia kuin ilmankeskilämpötilat. Suurimassa osassa maata pohjaveden lämpötila on korkeampi kuin ilman lämpötila. Ainoastaan muutamista paikoista Etelä- ja Keski-Suomea voidaan löytää alueita, joissa ilman lämpötila on pohjaveden lämpötilaa korkeampi.

Suomessa ei ole nähtävissä selkeitä alueita, joilla ilman ja pohjaveden lämpötilat vastaisivat toisiaan täysin (kuva 17). Kartasta voidaan havainnoida alueet, joilla ilman ja pohjaveden lämpötilat vastaavat toisiaan puolen asteen tarkkuudella. Kuten voidaan huomata, havaintopisteitä, joissa ilman ja pohjaveden lämpötilat ovat suunnilleen samat, ei löydy Suomesta paljon. Havainnot myös sijaitsevat ympäri Suomea, ulottuen aina Etelä-Suomesta Pohjois-Suomeen. Eniten saman lämpötilan omaavia havaintoja on löydettävissä Etelä-Suomesta.



Kuva 16. Pohjaveden ja ilman lämpötilojen välinen ero, jossa pohjaveden lämpötila (2000–2017) perustuu Hertta-tietokannasta (2017), Arolan (2015) väitöskirjasta ja Lahermon et al. (1999) kirjasta saatuihin pohjaveden lämpötilatietoihin. Ilman keskilämpötilakartta vuosilta 1981–2010 on peräisin Ilmatieteenlaitokselta. (Pohjakartat © Maanmittauslaitos 2017)



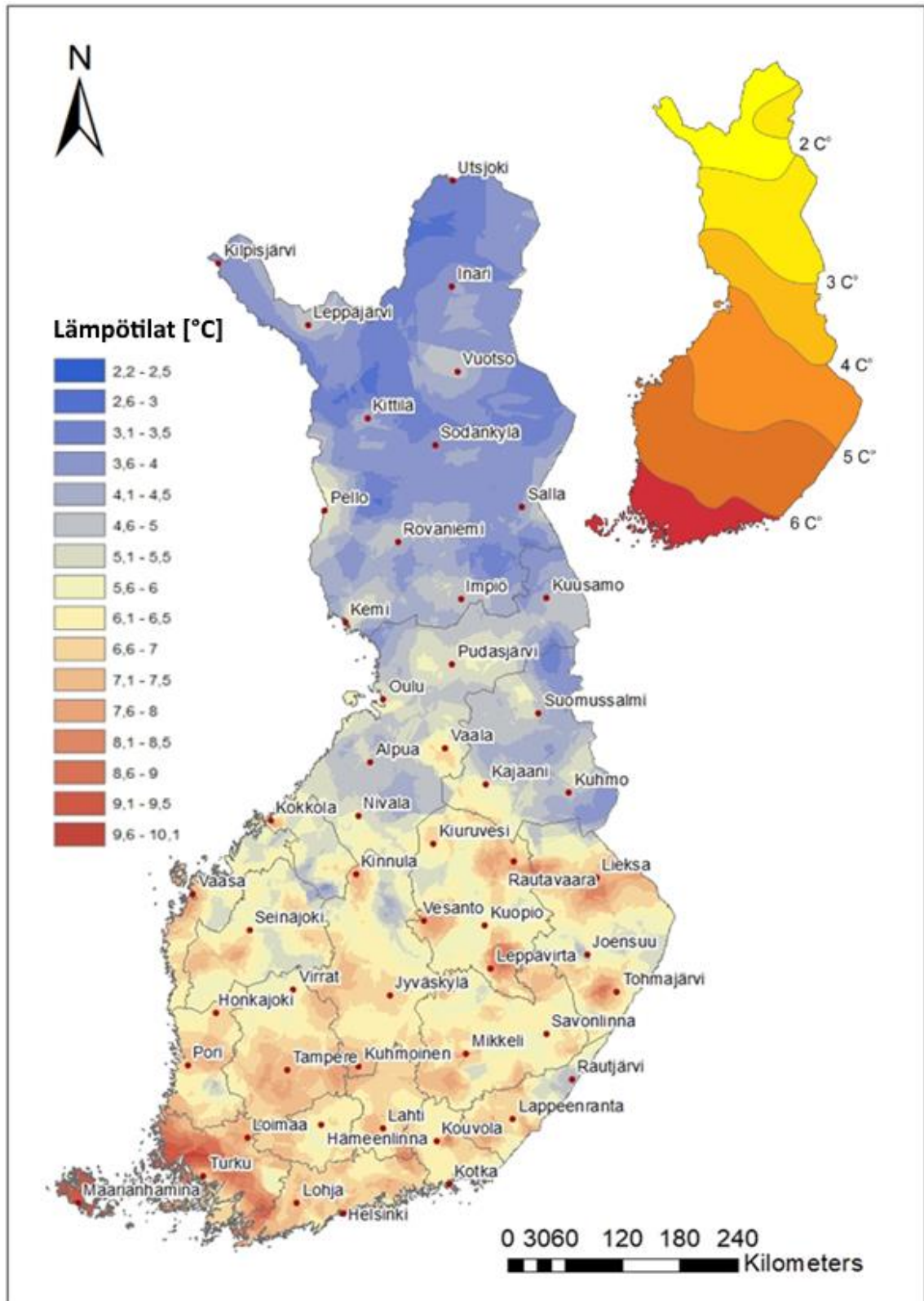
Kuva 17. Alueet, joissa ilman (1981–2010) ja pohjaveden (2000–2017) lämpötilat vastaavat toisiaan puolen asteen tarkkuudella. (Pohjakartat © Maanmittauslaitos 2017)

6.1.2 Maanpinnan lämpötila

Kausittaiset (vuodenaikaan liittyvät) pohjaveden lämpötilan vaihtelut ovat yleensä havaittavissa vain noin 10 metrin syvyyteen asti maanpinnasta, minkä jälkeen lämpötilojen vaihtelu on pientä tai olosuhteet voivat olla stabiilit (Banks 2012). Pohjavesisysteemien lämpötilojen on havaittu olevan ensimmäisten kymmenien metrien syvyydellä lähes samoja kuin maanpinnan vuosittaisten keskilämpötilojen (Stauffer et al. 2014). Maanpinnan ja matalapohjaveden välistä lämpötilaeroa on tutkittu muun muassa Benz et al. (2017) toimesta. Tutkimuksessa useita mittauksia koottiin eri maista ympäri maailman matalapohjaveden ja maanpinnan välisen lämpötilaeron selville saamiseksi. Pohjaveden lämpötila oli 83 % tapauksia korkeampi kuin maanpinnan lämpötila ja pohjaveden lämpötila oli eniten kohonnut verrattuna maanpinnan lämpötilaan maapallon kylmimmillä ja lämpimimmillä alueilla. Tämän todettiin johtuvan kahdesta tekijästä: lumesta ja evapotranspiraatiosta. Kylmillä alueilla lumi toimii eristeenä estäen kylmän ilman pääsyn syvemmälle maaperään, kun taas lämpimillä ja kosteilla alueilla evapotranspiraatio aiheuttaa maanpinnan viilenemisen kuljettamalla piilevää lämpöä.

Tässä työssä verrattiin maanpinnan ja matalapohjaveden lämpötilatietoja toisiinsa, jotta saataisiin selville kuinka pohjaveden ja maanpinnan lämpötilat eroavat toisistaan ja kuinka suuri vaikutus maanpinnan lämpötilalla on pohjaveden lämpötilaan Suomessa. Vertailua varten Suomen 2000-luvun lämpötila-aineisto jaoteltiin kaupunki- ja maaseutualueisiin Corine-maanpeittetietokannan avulla ja kartasta poistettiin kaupunkialueiden lämpötilatiedot, jotta saataisiin selville Suomen luonnollinen, häiriintymätön matalapohjaveden lämpötila. Luonnontilaisia pohjavesien lämpötilatietoja verrattiin Leppäharjun (2008) tekemään maanpinnan keskilämpötilakarttaan.

Pohjaveden ja maanpinnan lämpötilojen voidaan havaita vastaavan toisiaan suhteellisen hyvin (kuva 18). Etenkin Pohjois-Suomessa pohjaveden ja maanpinnan lämpötilat muistuttavat toisiaan huomattavasti, Etelä-Suomessa pohjaveden lämpötilan ollessa maanpinnan keskilämpötilaa muutaman asteen verran korkeampi. Vaikuttaisikin siltä, että tutkimusalueella pohjaveden lämpötila noudattelee varsin hyvin maanpinnan vuotuista keskilämpötilaa, ehkä jopa enemmän kuin vuosittaista ilman keskilämpötilaa.



Kuva 18. Maaseutualueiden pohjavesien lämpötilat, jossa pohjaveden lämpötila (2000–2017) perustuu Hertta-tietokannasta (2017), Arolan (2015) väitöskirjasta ja Lahermon et al. (1999) kirjasta saatuihin pohjaveden lämpötilatietoihin. Pieni kuva oikeassa yläreunassa kuvaa maanpinnan keskilämpötiloja Suomessa vertailukautena 1971–2000 (Mukaillen Leppäharju 2008). (Pohjakartat © Maanmittauslaitos 2017)

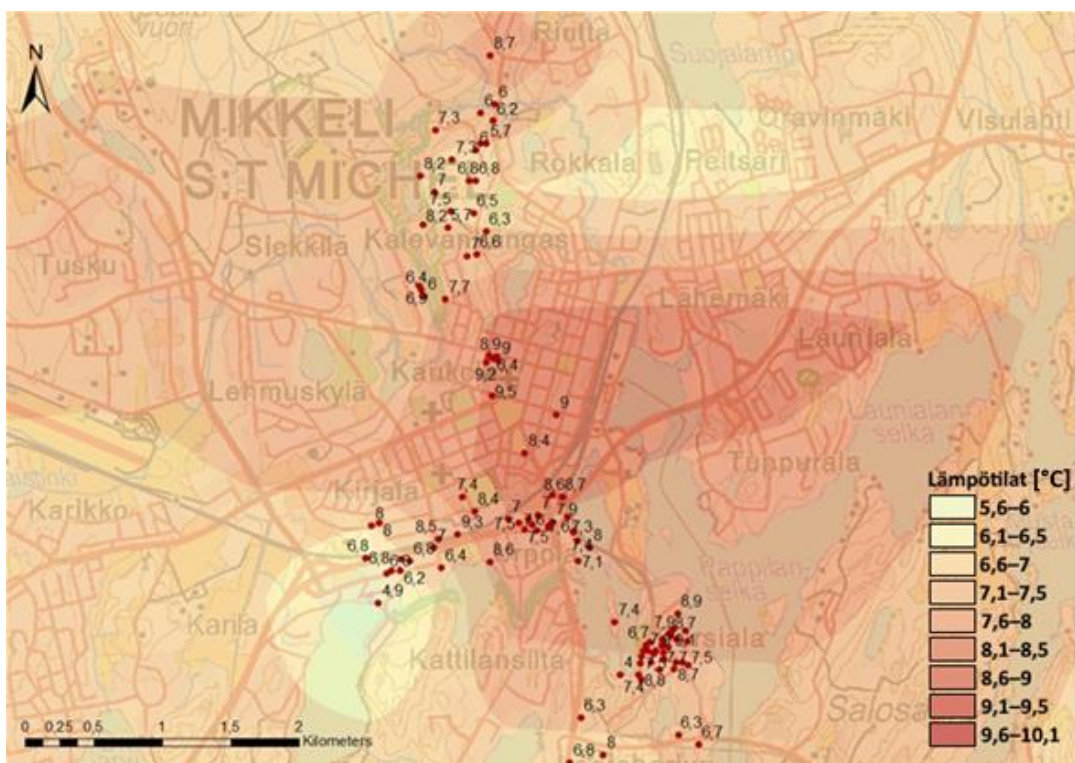
6.1.3 Lämpösaarekeilmiö

Kaupunkien ilman on havaittu lämmenneen merkittävästi viimeisen vuosisadan aikana verrattuna ympäröiviin luonnontilaisiin alueisiin (Oke 1973). Kaupunkien ilman kohonneet lämpötilat eivät liity vain ilmastomuutokseen, vaan kyse on lämpösaarekeilmiöstä, jossa kaupungistumisen aiheuttamat muutokset synnyttävät mikroilmaston kaupunkien alueelle (Allen et al. 2003, Menberg et al. 2013). Mikroilmaston muodostuminen on seurausta kaupungistumisen aiheuttamasta maankäytön muutoksesta, kuten esimerkiksi rakennusten ja infrastruktuurin kehittämisestä (Menberg et al. 2013, Allen et al. 2003). Kaupungin koon ja väkiluvun on myös havaittu olevan yhteydessä ilman lämpötilojen kohoamiseen (Oke 1973).

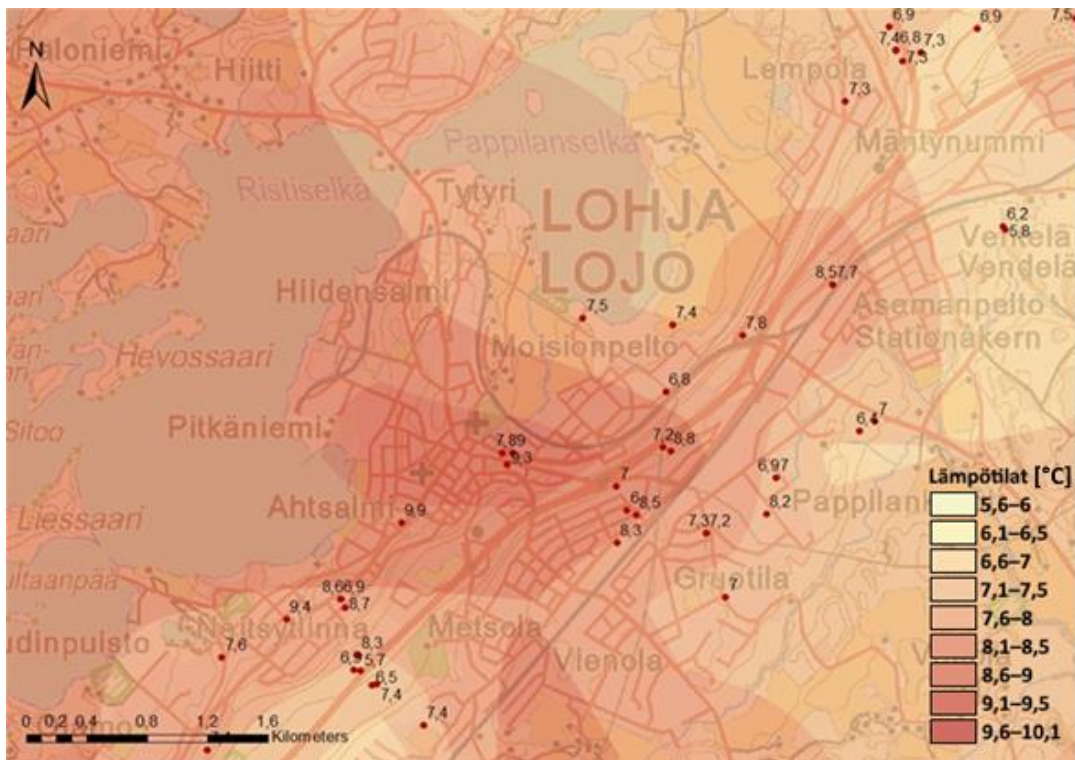
Kaupunkien lämpösaarekeilmiön seurauksena myös maanpinnan, maankamaran ja pohjaveden lämpötilat voivat kohota jopa 3-5 °C verran (Menberg et al. 2003, Ferguson ja Woodbury 2007). Ilmiötä on tutkittu eri puolilla maailmaa ja esimerkiksi Perrierin et al. (2005) tutkimukset Pariisissa ja Fergusonin ja Woodburyn (2007) tutkimukset Kanadan Winnipegissä ovat osoittaneet kaupunkien maan ja pohjaveden lämpötilojen kohonneen huomattavasti luonnontilaisiin alueisiin verrattuna. Lämpösaarekeilmiötä on tutkittu myös Suomessa kolmessa eri kaupungissa, Turussa, Lohjassa ja Lahdessa (Arola ja Korkka-Niemi 2014). Tutkimuksessa kävi ilmi, että mitä lähempänä havaintopiste oli kaupungin keskustaa, sitä korkeampia olivat pohjaveden lämpötilat. Korkeimmat lämpötilat havaittiin lähellä suuria rakennuksia. Lämpötilojen on aiemminkin havaittu jakautuvan epätasaisesti suurissa kaupungeissa siten, että lämpötilat ovat korkeimpia rakennetuissa keskustoissa kuin alueilla, joilla on puistoja ja istutuksia (Allen et al. 2003). Tämä on merkittävää, sillä jo muutaman asteen lämpötilojen nousun seurauksena kaupunkien alla sijaitsevaa pohjavettä voidaan hyödyntää entistä tehokkaammin geotermisen energian lähteenä (Allen et al. 2003).

Tässä tutkimuksessa lämpösaarekeilmiö havaitaan selkeästi ja lämpötilojen huomattiin olevan korkeampia kaupunkien alueella verrattuna ympäröiviin maaseutualueisiin. Ilmiö on havaittavissa etenkin suurissa kaupungeissa kuten Oulussa, Vaasassa, Porissa, Turussa, Tampereella ja Lahdessa. Lämpötilojen kohoaminen kaupunkialueilla on havaittavissa läpi koko Suomen, aina Etelä-Suomesta Pohjois-Suomeen saakka. Erityisen selkeästä lämpösaarekeilmiöstä on havaittavissa esimerkiksi Mikkelissä, Lahdessa, Turussa ja Lohjalla (kuva 19, kuva 20, kuva 21, kuva 22). Näissä kaupungeissa lämpötilojen voidaan havaita olevan korkeampia keskustojen alueella ja lämpötilojen laskevan mentäessä

keskusta-alueen ulkopuolelle. Lämpösaarekeilmiötä ei kuitenkaan odotuksista poiketen havaittu jokaisen suuren kaupungin alueella. Yhtenä syynä tähän on oletettavasti näytepisteiden vähyys ja hajanainen sijoittuminen. Esimerkiksi Helsingissä havaintopisteet kiertävät keskustan alueen ja ovat lähempänä Helsingin seudun rajoja kuin itse keskusta-alueetta, jolloin mahdollinen lämpösaarekeilmiö Helsingissä ei erotu kartalla. Myös joissakin muissa kaupungeissa, kuten Savonlinnassa ja Joensuussa, tilanne on samankaltainen. Lämpösaarekeilmiöllä on kuitenkin kokonaisuudessaan suuri merkitys pohjaveden lämpötiloihin Suomessa.



Kuva 19. Lämpösaarekeilmiö Mikkelissä perustuen Herttatietokannasta (2017), Arolan (2015) väitöskirjasta ja Lahermon et al. (1999) kirjasta saatuihin pohjaveden lämpötilatietoihin vuosilta 2000–2017. (Pohjakartat © Maanmittauslaitos 2018)



Kuva 22. Lämpösaarekeilmiö Lohjalla perustuen Herttatietokannasta (2017), Arolan (2015) väitöskirjasta ja Lahermon et al. (1999) kirjasta saatuihin pohjaveden lämpötilatietoihin vuosilta 2000–2017. (Pohjakartat © Maanmittauslaitos 2018)

6.1.4 Akviferin ominaisuudet

Tutkimuksessa tarkasteltiin ilman ja maanpinnan lämpötilan sekä lämpösaarekeilmiön ohella pohjavesimuodostumien ominaisuuksien vaikutusta matalapohjaveden lämpötilaan tutkittavalla alueella. Työssä verrattiin Suomen ympäristökeskuksen Hertta-tietokannan pohjaveden lämpötilatietoja pohjavesialueiden pinta-alaan ja muodostuvan pohjaveden määrään.

Pohjavesialueen pinta-alalla (taulukko 1) näyttäisi olevan pieni vaikutus pohjaveden lämpötiloihin. Aluksi pohjaveden lämpötila vaikuttaa hieman kohoavan pinta-ala kasvaessa, mutta sitten lämpötila tasaantuu ja pysyy suhteellisen vakiona pinta-alan muuttuessa. Toki pohjavesialueen pinta-alaluokissa olevien alueiden määrässä on huomattavia eroja. Esimerkiksi pinta-alaltaan 1-10 km² laajuisia pohjavesialueita on tuhansia ja suuria yli 30 km² pohjavesialueita vain muutamia kymmeniä. Taulukossa 1 ei otettu huomioon pohjoisten ja eteläisten alueiden jakautumista, mutta taulukossa 2 on verrattu ainoastaan Lapin pohjavesialueiden pinta-alaa ja pohjaveden lämpötilaa toisiinsa. Erikokoisia

pohjavesialueita oli kuitenkin suhteellisen vähän tällä alueella, mikä voi vaikuttaa siihen, ettei pohjavesialueen pinta-alan ja lämpötilan välillä näyttäisi olevan suurta yhteyttä toistensa kanssa.

Taulukko 1. Pohjavesialueen pinta-alan vaikutus pohjaveden lämpötilaan. (Tiedot Hertta-tietokanta 2017)

Pohjavesialueen pinta-ala [km ²]	pohjavesialueiden määrä	Näytepisteiden määrä	Min °C	Max °C	Ka °C
<1	307	647	1,7	9,7	5,2
1-10	1009	4033	0,2	10	5,7
11-20	64	530	2,4	9,7	6,1
21-30	23	426	1,8	9,7	6
31-80	14	250	1,1	10,3	6

Taulukko 2. Pohjavesialueen pinta-alan vaikutus pohjaveden lämpötilaan Lapissa. (Tiedot Hertta-tietokanta 2017)

Pohjavesialueen pinta-ala [km ²]	Näytepisteiden määrä	Min °C	Max °C	Ka °C
<1	221	1,7	8	4
1-5	385	1,5	10	4
6-12	77	1,2	8,1	4,4
20-60	3	3	3,3	3,1

Muodostuvan pohjaveden määrä vaikuttaa pohjaveden lämpötilaan nostavasti (taulukko 3). Sitä mukaan, kun muodostuvan pohjaveden määrä kasvaa, myös pohjaveden lämpötila kohoaa. Vaikutus on selkeimmin havaittavissa aina siihen asti, kun pohjavettä muodostuu noin 12 000 m³ vuorokaudessa. Tämän jälkeen pohjaveden lämpötilat vaihtelevat voimakkaasti, eikä yhtä selkeitä eroja ole havaittavissa. Parhaimmillaan akvifereja on satoja, mutta vähimmillään vain yksi, joka täytyy huomioida tuloksia tulkittaessa.

Taulukko 3. Muodostuvan pohjaveden määrän vaikutus pohjaveden lämpötilaan. (Tiedot Hertta-tietokanta 2017)

Arvio muodostuvan pohjaveden määrästä [m ³ /d]	Pohjavesialueiden lukumäärä	Lämpötilanäytteiden lukumäärä	Min °C	Max °C	Ka °C
0-100	84	159	1,7	8,2	4,9
101-500	418	949	1	9,9	5,4
501-1000	325	1078	0,2	10	5,5
1001-2000	260	1195	0,3	10	5,8
2001-3000	109	582	1	9,8	5,8
3001-4000	62	417	1,2	9,6	5,9
4001-5000	28	196	1,3	9,4	6,2
5001-6000	22	130	1,2	9,2	5,5
6001-7000	25	232	2,5	9,7	6,5
7001-8000	9	120	3,9	9,1	6,3
8001-9000	10	68	3,9	8,7	6,5
9001-10 000	8	108	3	9,3	6,3
10 001-11 000	9	126	3	9,2	6,3
11 001-12 000	4	131	3,2	9,1	6
12 001-13 000	1	22	7,1	9,3	8,3
13 001-14 000	1	22	3,8	8,5	5,4
14 001-15 000	5	89	1,1	7,4	4,4
15 001-16 000	1	24	4,1	9,7	5,5
16 001-17000	3	7	1,8	7,2	5,9
20 000	5	71	4	8,5	6,5
25 000-25 500	2	31	4,8	7,8	5,8
30 000-35 000	3	53	3,5	10,3	7,5
45 000	1	14	6,1	8,4	7,5

6.2. Geoenergiapotentiaalin arviointi

Pohjaveden lämpötilalla ja saatavuudella on keskeinen merkitys hyödynnettäessä pohjavettä lämmitys- ja viilennysenergian lähteenä. Suomen kylmissä olosuhteissa rakennusten lämmitysvaatimukset ovat korkeat, mutta luonnollinen pohjaveden lämpötila on suhteellisen alhainen, varsinkin maan pohjoisosissa. Arolan (2015) mukaan Suomessa pohjavettä voidaan hyödyntää energialähteenä alimmillaan 4 °C lämpötilaan saakka. Myös tätä kylmempiä pohjavesijärjestelmiä olisi mahdollista hyödyntää, mutta silloin pohjaveden pumppaustarve kasvaa ja systeemin tehokkuus laskee.

Pohjaveden käyttö energialähteenä perustuu pohjavesimuodostumiin, jotka ovat geologisesti ja geokemiallisesti sopivia pohjavesienergiaa hyödyntäviin systeemeihin ja jotka esiintyvät kaupunki- tai teollisuuskäyttöön kaavoitetuilla alueilla (Arola et al. 2014). Kaukana kaupungeista ja teollisuusalueista esiintyvät pohjavesivarat eivät ole taloudellisesti hyödynnettävissä liian pitkien etäisyyksien vuoksi (Arola et al. 2015). Tärkeää on myös huomioida kaupungistumisen ja lämpösaarekeilmiön vaikutus pohjaveden lämpötilaan, sillä lämpötilojen kohoaminen kasvattaa pohjaveden energiapotentiaalia merkittävästi (Allen et al. 2003).

Laskettaessa pohjaveteen sitoutunutta energiapotentiaalia, käytetään laskukaavaa 2. Kaava kuvaa lämpömäärää, jonka voi hyödyntää virtaavasta pohjavedestä. Lämmitysteho (C) saadaan kertomalla yhteen vesimäärä (Z), lämpötilaero ($\Delta\Theta$) ja veden ominaislämpökapasiteetti (S_{VCwat}).

$$C = Z * \Delta\Theta * S_{VCwat} \quad (\text{kaava 2})$$

C= Lämmitysteho (W)

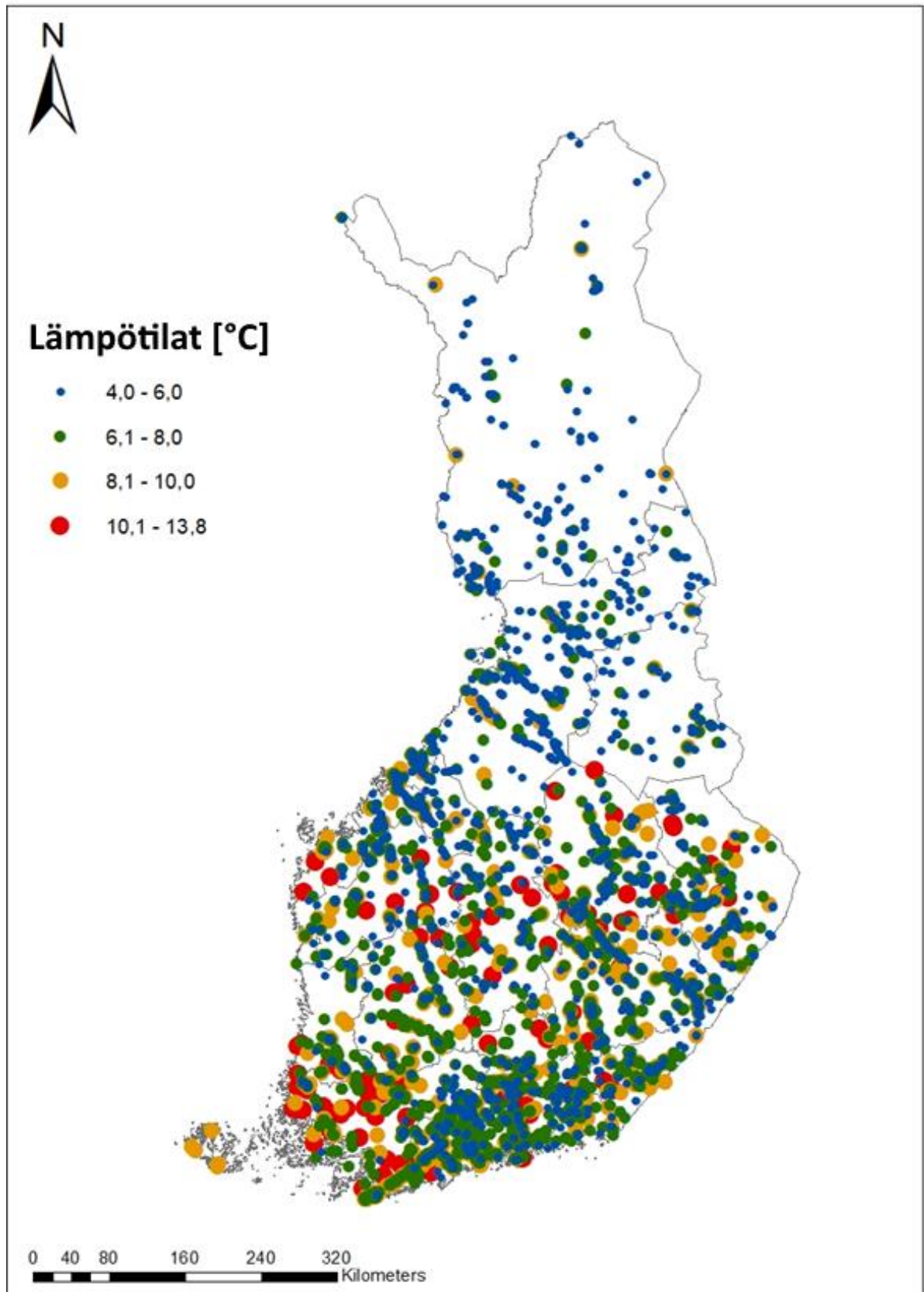
Z= Vesimäärä (l/s)

$\Delta\Theta$ = Lämpötilaero (K)

S_{VCwat} = Ominaislämpökapasiteetti (J/I*K).

Valtakunnallisesta lämpötilakartoituksesta ilmeni, että pohjaveden lämpötilat ovat korkeimmillaan Etelä-Suomessa ja laskevat kohti Pohjoista-Suomea (Kuva 23). Kartoituksen perusteella Suomen pohjavettä voidaan käyttää sekä lämmitys- että viilennysenergian lähteenä. Lämmitystä varten pohjavettä voidaan käyttää paremmin Etelä-Suomessa, mutta Pohjois-Suomessa vesi sopii paremmin viilennystarkoitukseen matalan lämpötilansa vuoksi.

Lämpösaarekeilmiö on havaittavissa selkeästi maan suurimmissa kaupungeissa, mikä lisää geotermisen energian hyödyntämismahdollisuuksia näillä alueilla. Yksi syy Etelä-Suomen akviferien suurempaan energiapotentiaaliin on suurempi asukastiheys etelässä verrattuna pohjoiseen (Arola 2015). Parhaiten lämmityskäyttöön soveltuvat vedet ovat Salpausselkien alueelta. Pohjaveden saatavuudella ja määrällä on myös oleellinen osa hyödynnettäessä pohjavettä energialähteenä, mikä tulee huomioida suunniteltaessa pohjavesienergian käyttöä.



Kuva 23. Pohjavettä voidaan käyttää energialähteenä 4 °C saakka. Kuvassa alueet, joilla Suomen matalapohjaveden lämpötila ylittää tämän 4 °C. (Pohjakartat © Maanmittauslaitos)

6.3 Tulosten luotettavuus

Työssä on useita mahdollisia virhelähteitä, jotka tulee huomioida tuloksia tarkasteltaessa. Eräs suurimmista virhelähteistä johtuu käytössä olleesta aineistosta. Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämästä Hertta-tietokannasta kerätyn aineiston mahdollisia virhelähteitä ovat mittausten mahdollinen epäjohtonmukaisuus: mittaukset ovat otettu eri ihmisten toimesta eri aikoina ja paikoissa, joten mittausmenetelmät ja -tarkkuudet ovat saattaneet vaihdella. Pohjavesiputkissa ilman lämpötila vaikuttaa pohjaveden lämpötilaan tiettyyn syvyyteen saakka, jonka takia pohjavesiputkista otetut lämpötilat eivät ole aina aivan tarkkoja. Aina ei ollut saatavilla tietoa, miltä syvyydeltä näytteet on otettu. Hertta-tietokannan aineistosta ei lopulta otettu ylös näytteenottosyvyyyksiä, sillä näytesyvyyydet vaihtelivat saman mittauspisteen eri mittauksissa hyvinkin paljon ja osassa mittauksista ei ollut merkitty näytteenottosyvyyyksiä. Lämpötilat ovat joka tapauksessa keskiarvo eri syvyyksiltä ja eri vuodenaikoina otettujen näytteiden lämpötiloista.

Kartoituksessa tuloksien epätarkkuutta aiheuttaa havaintopisteiden harva ja hajanainen sijoittuminen. Lämpötilojen interpolointi on joidenkin maakuntien osalta vääristynyt. Varsinkin Lapissa, Kainuussa, Pohjois-Pohjanmaalla ja Satakunnassa on alueita, missä havaintopisteiden määrä on vähäinen. Muiden maakuntien osalta näytepisteitä on enemmän – etenkin Uudellamaalla, Kymenlaaksossa ja Etelä-Karjalassa näytepisteitä on paljon ja näiden maakuntien kohdalla interpoloinnin voidaan olettaa olevan varsin tarkka.

7. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimus osoitti, että Suomen matalapohjaveden lämpötila vaihteli 1900-luvun kartoituksessa 2,2–8 °C välillä ja 2000-luvun kartoituksessa 2,2–10,1 °C välillä. Yleisesti ottaen Suomen pohjaveden lämpötilat viilenevät mentäessä etelästä pohjoiseen ja lännestä itään. Lämpötiloihin vaikuttaa eniten maan sijainti pohjoisilla leveysasteilla ja veden voidaan havaita viilenevän selkeästi etelästä pohjoiseen mentäessä. Kaupunkien lämmittävä vaikutus on myös selvästi nähtävissä ja lämpösaarekeilmiö voidaan havaita maan suurimmissa kaupungeissa, myös maan pohjoisosissa. Lämpötilat ovat kohonneet eniten

kaupunkien keskustoissa jopa 6 °C verran. Matalapohjaveden lämpötilat ovat noin 2-6 °C korkeampia kaupungeissa kuin ympäröivillä luonnontilaisilla alueilla.

Suomen matalapohjaveden lämpötilaan vaikuttavat muun muassa ilmasto-olot, maanpinnan keskilämpötila ja kaupunkien lämpösaarekeilmiö. Sen sijaan akviferien ominaisuuksilla ei vaikuttanut olevan yhtä suurta merkitystä pohjaveden lämpötilaan. Maanpinnan lämpötilalla sen sijaan näytti olevan merkitys lämpötilaan ja luonnollinen pohjaveden lämpötila vaikutti seuraavan ennemmin vuotuista maanpinnan lämpötilan keskiarvoa kuin ilman vuotuista keskilämpötilaa. Etelä-Suomessa pohjaveden lämpötilat olivat enimmillään muutaman asteen maanpinnan lämpötilaa korkeampi, mutta Keski- ja Pohjois-Suomessa pohjaveden ja maanpinnan lämpötilat muistuttavat huomattavasti toisiaan.

Tutkimuksesta kävi ilmi, että Suomen matalapohjavettä voidaan käyttää sekä lämmitys- ja viilennysenergiana eri puolilla maata. Lämmitysenergiaksi pohjavesi sopii parhaiten maan eteläosissa, jossa vesi on huomattavasti maan pohjoisosien vettä lämpimämpää. Lämpimimmät vedet (10,1 °C) löydetään lounaiselta rannikkoalueelta, mutta esimerkiksi myös Salpausseliltä voidaan löytää lämpimiä vesiä. Kaupunkien lämmittävä vaikutus voi kuitenkin kohottaa vesien lämpötilaa jopa 2-6 °C verran ja siten lisätä energiapotentiaalia pohjoisemminkin alueilla. Koska matalapohjavesi on Suomen olosuhteissa helposti tavoitettava ja runsaana esiintyvä uusiutuva luonnonvara, tulisi se huomioida entistä paremmin energialähteenä.

Tulevaisuudessa Suomen pohjaveden lämpötilan tutkimusta voitaisiin jatkaa esimerkiksi kartoittamalla eri vuosikymmenten pohjaveden keskilämpötilat, jolloin voitaisiin selvittää pohjaveden lämpötiloissa tapahtunutta muutosta ajan suhteen.

8. KIITOKSET

Haluaisin kiittää ohjaajiani Kirsti Korkka-Niemeä Helsingin yliopiston geotieteiden ja maantieteen osastolta sekä Teppo Arolaa geologian tutkimuskeskukselta työni ohjaamisesta ja neuvoista työn kaikissa vaiheissa. Kiitos myös Maa- ja vesitekniikan tuki ry:lle graduni rahoittamisesta. Suuri kiitos perheelleni ja ystäväilleni, erityisesti Ida Hiltuselle ja Anniina Höltälle, tuestanne graduprosessin aikana. Kiitos myös kaikille muille henkilöille, jotka ovat avustaneet ja tukeneet minua työn aikana.

VIITTELUETTELO

- Allen, A., Milenic, D. ja Sikora, P. 2003. Shallow gravel aquifers and the urban 'heat island' effect: a source of low enthalpy geothermal energy. *Geothermics*, 32, 569-578.
- Arola, T. 2015. Groundwater as an energy resource in Finland. Department of Geosciences and Geography, 34 s. (väitöskirja)
- Arola, T. ja Korkka-Niemi, K. 2014. The effect of urban heat islands on geothermal potential: examples from Quaternary aquifers in Finland. *Hydrogeology Journal*, 22, 1953-1967.
- Arola, T., Eskola, L., Hellen, J. ja Korkka-Niemi, K. 2014. Mapping the low enthalpy geothermal potential of shallow Quaternary aquifers in Finland. *Geothermal Energy*, 2, 20 s.
- Backman, B., Lahermo, P., Väisänen, U., Paukola, T., Juntunen, R., Karhu, J., Pullinen, A., Rainio, H. ja Tanskanen, H. 1999. Geologian ja ihmisen toiminnan vaikutus pohjaveteen. Seurantatutkimuksen tulokset vuosilta 1969 – 1996. Geologian tutkimuskeskus, Espoo, 261 s.
- Banks, D. 2012. *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*. Blackwell Publishing, Oxford, UK. 526 s.
- Benz, S. A., Bayer, P. ja Blum, P. 2017. Global patterns of shallow groundwater temperatures. *Environmental Research Letters*, 12, 8 s.
- Bonte, M., Stuyfzand, P. J., Hulsmann, A., ja Van Beelen, P. 2011. Underground Thermal Energy Storage: Environmental Risks and Policy Developments in the Netherlands and European Union. *Ecology and Society*, 16, 22 s.
- Britschgi, R., Antikainen, M., Ekholm-Peltonen, M., Hyvärinen, V., Nylander, E., Siiro, P. ja Suomela, T. 2009. Pohjavesialueiden kartoitus ja luokitus. Ympäristöopas 2009. Finnish Environment Institute, Helsinki, 75 s.
- Briellmann, H., Griebler, C., Schmidt, S. I., Michel, R., ja Lueders, T. 2009. Effects of thermal energy discharge on shallow groundwater ecosystems. *FEMS Microbiology Ecology*, 68, 273-286.
- Cabeza, L. 2015. *Advances in Thermal Energy Storage System. Methods and applications*. Woodhead Publishing. Cambridge England.
- Carter, T. R. 2007. Suomen kyky sopeutua ilmastonmuutokseen: FINADAPT. Yhteenveto päättäjille/Assessing the adaptive capacity of the Finnish environment and society under a changing climate: FINADAPT. Summary for Policy Makers, 76 s.
- EUR-Lex. 2009. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/28/EY. Euroopan unionin virallinen lehti. Sivulla vierailtu 13.11.2017. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/ALL/?uri=CELEX:32009L0028>
- Fan, Y., Li, H. ja Miguez-Macho, G. 2013. Global patterns of groundwater table depth. *Science*, 339, 940-943.
- Ferguson, G. ja Woodbury, A. D. 2007. Urban heat island in the subsurface. *Geophysical research letters* 34.
- GTK. 2018a. Geoenergia. Sivulla vierailtu 29.7.2018. <http://www.gtk.fi/geologia/luonnonvarat/geoenergia/>
- Haehnlein, S., Bayer, P. ja Blum, P. 2010. International legal status of the use of shallow geothermal energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 2611-2625.
- Hertta-tietokanta. 2017. Sivulla vierailtu 13.11.2017. <https://www.p2.ymparisto.fi/scripts/kirjau.asp>
- Hähnlein, S., Bayer, P., Ferguson, G. ja Blum, P. 2013. Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. *Energy Policy* 59, 914 – 925.
- Juvonen, J. ja Lapinlampi, T. 2013. Energiakaivo. Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Ympäristöopas 2013. Ympäristöministeriö, 68 s.
- Kinnunen, T. 2005. Pohjavesitutkimusopas, käytännön ohjeita. Suomen Vesiyhdistys.
- Korkka-Niemi, K. ja Salonen, V-P. 1996. Maanalaiset vedet. Turun yliopiston täydennyskoulutuskeskuksen julkaisuja. Turun yliopisto, 181s.
- Korkka-Niemi K. 2001. Cumulative geological, regional and site-specific factors affecting groundwater quality in domestic wells in Finland. *Monogr Boreal Environ Res* 20.

- Kranz, S. ja Frick, S. 2013. Efficient cooling energy supply with aquifer thermal energy storages, Germany. *Applied Energy* 109, 321 – 327.
- Kukkonen, L. 2000. Geothermal energy in Finland. In: *Proceedings World Geothermal Congress 2000 in Kyushu – Tohoku, Japan*. International Geothermal Association, 277 – 282.
- Kytölä, A. 2015. Kurikasta löytyi yllättävä pohjavesiesiintymä. *Geofoorumi* 1, 20–21.
- Lahermo, P., Ilmasti, M., Juntunen, R. ja Taka, M. 1990. Suomen geokemian atlas, osa 1. Suomen pohjavesien hydrogeokemiallinen kartoitus. *The Geochemical Atlas of Finland, Part, 1*, 66 s.
- Lahermo, P., Tarvainen, T., Hatakka, T., Backman, B., Juntunen, R., Kortelainen, N. ja Suomela, P. 2002. Tuhat kaivoa–Suomen kaivovesien fysikaalis-kemiallinen laatu vuonna 1999, 92 s.
- Leppäharju, N. 2008. Kalliolämmön hyödyntämiseen vaikuttavat geofysikaaliset ja geologiset tekijät. Pro gradu-tutkielma, Oulun yliopisto, Fysikaalisten tieteiden laitos, 79s.
- McKenzie, J. M., Voss, C. I. ja Siegel, D. I. 2007. Groundwater flow with energy transport and water–ice phase change: numerical simulations, benchmarks, and application to freezing in peat bogs. *Advances in water resources*, 30, 966–983.
- Menberg, K., Bayer, P., Zosseder, K., Rumohr, S. ja Blum, P. 2013. Subsurface urban heat islands in German cities. *Science of the total environment*, 442, 123–133.
- Milenic, D., Vasiljevic, P. ja Vranjes, A. 2009. Criteria for use of groundwater as renewable energy source in geothermal heat pump systems for building heating/cooling purposes, Serbia. *Energy and Buildings* 42, 649–657.
- Mustonen, S. 1986. Sovellettu hydrologia. *Vesiyhdistys: Helsinki*, 503 s.
- Mälkki, E. 1999. Pohjavesi ja pohjaveden ympäristö. Tammer-Paino Oy, Tampere. 304 s.
- Oke, T. 1973. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, 7, 769–779.
- Perrier, F., Le Mouél, J. L., Poirier, J. P. ja Shnirman, M. G. 2005. Long-term climate change and surface versus underground temperature measurements in Paris. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 25, 1619–1631.
- Sanner B. 2001. Shallow Geothermal Energy. *GHC Bulletin*, OR, USA, 19–25
- Stauffer, F., Bayer, P., Blum, P., Giraldo, N. M. ja Kinzelbach, W. 2014. Thermal use of shallow groundwater. *CRC Press*, 282 s.
- Suomen ympäristökeskus. 2018. Pohjavesialueet. Sivulla vierailtu 7.6.2018. [http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Vesiensuojelu/Pohjaveden_suojelu/Pohjavesialueet/Pohjavesialueet\(26765\)](http://www.ymparisto.fi/fi-FI/Vesi/Vesiensuojelu/Pohjaveden_suojelu/Pohjavesialueet/Pohjavesialueet(26765))
- Tilastokeskus. 2018. Uusiutuva energia. Sivulla vierailtu 7.6.2018. http://tilastokeskus.fi/til/ehk/2017/04/ehk_2017_04_2018-03-28_tie_001_fi.html?ad=notify
- Työ- ja elinkeinoministeriö 2018. Uusiutuva energia. Sivulla vierailtu 7.6.2018. <https://tem.fi/julkaisu?pubid=URN:NBN:fi-fe201803145991>
- Vienonen, S., Rintala, J., Orvomaa, M., Santala, E., ja Maunula, M. 2012. Ilmastonmuutoksen vaikutukset ja sopeutumistarpeet vesihuollossa, 86 s.
- Xu, J., Wang, R.Z. ja Li, Y. 2013. A review of available technologies for seasonal thermal energy storage, China. *Solar Energy* 103, 610 – 638.
- Zhu, K., Blum, P., Ferguson, G., Balke, K-D. ja Bayer, P. 2010. The geothermal potential of urban heat islands, Germany. *Environmental research letters* 5, 6 s.